

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DRENAGEM DE PEQUENAS POTÊNCIAS EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA EM CORRENTE CONTÍNUA:
ESTAÇÃO CONVERSORA SÉRIE.

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

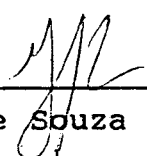
José Renato Rodrigues Ponte

Florianópolis, junho de 1992.

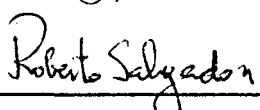
**DRENAGEM DE PEQUENAS POTÊNCIAS EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA EM CORRENTE CONTÍNUA:
ESTAÇÃO CONVERSORA SÉRIE.**

José Renato Rodrigues Ponte

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, especialidade Engenharia Elétrica, e aprovada em sua forma final pelo programa de pós-graduação.



Luiz Gonzaga de Souza Fonseca (D.Sc.) - Orientador

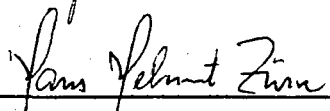


P/ João Pedro de Assumpção Bastos (Dr.D'Etat)
Coordenador do Curso

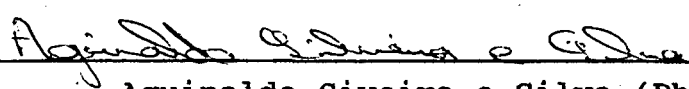
Banca Examinadora:



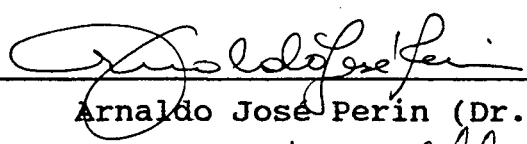
Luiz Gonzaga de Souza Fonseca (D.Sc.) - Presidente



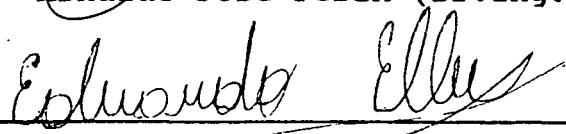
Hans Helmut Zürn (Ph.D.)



Aguinaldo Siveira e Silva (Ph.D.)



Arnaldo José Perin (Dr.Ing.)



Eduardo Henrique Ellery Filho (M.Sc.)

às minhas meninas Cristina, Gabriela e Juliana.

Agradecimentos.

Gostaria de externar meus agradecimentos às Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A. - ELETRONORTE, em especial ao Departamento de Planejamento Elétrico, pela oportunidade de desenvolvimento e publicação deste trabalho.

Aos colegas da empresa ABB Power Systems, Ludvika - Suécia, pelo apoio, sugestões e contribuições.

Ao grande amigo Eduardo Henrique Ellery Filho, pelas tantas horas dedicadas às discussões e leitura dos originais deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina, na pessoa do orientador Luiz Gonzaga de Souza Fonseca, e a todos aqueles que me ajudaram direta ou indiretamente.

Ao mestre Jesus o Cristo, que há 2000 anos nos deixou a lição absoluta de amar a Deus sobre todas as coisas, e ao próximo como a nós mesmos.

CONTEÚDO...

1.- Introdução.	1
2.- Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua - Aspectos Gerais.	5
2.1.- Introdução.	5
2.2.- Aplicações da Tecnologia CCAT.	7
2.3.- Sistemas CCAT x CAAT: Vantagens e Desvantagens. .	9
2.4.- Sistemas Multiterminais de Corrente Contínua. . .	17
2.5.- Equipamentos da Estação Conversora.	21
2.6.- Distribuição de Custos na Estação Conversora. . .	25
2.7.- Drenagem de Pequenas Potências de um Sistema CCAT.	26
2.8.- Conclusões	28
3.- Alimentação de Pequenas Cargas ao Longo de Rotas de Linhas de Transmissão CCAT.	30
3.1.- Introdução.	30
3.2.- Estações Conversoras Série e Paralelo.	31
3.3.- A Estação Conversora Série.	34
3.4.- ECS de Comutação Natural.	40
3.5.- Conclusões	43
4.- Metodologia para o Dimensionamento Básico de uma Estação Conversora Série de Comutação Natural.	46
4.1.- Introdução.	46
4.2.- A Região Operativa.	47
4.3.- Dados e Premissas para Obtenção da RO.	52
4.4.- Construção da Região Operativa.	54

4.5.- Conclusões.	64
5.- Aplicação da Metodologia de Dimensionamento de uma Estação Conversora Série de Comutação Natural.	66
5.1.- Introdução.	66
5.2.- Dados e Premissas.	66
5.3.- Resultados Obtidos.	69
5.4.- Capacidade da ECS em Fornecer Potências Maiores que a Nominal.	75
5.5.- Especificação do Compensador Síncrono.	77
5.6.- Conclusões.	81
6.- Harmônicos e Filtros CA.	83
6.1.- Introdução.	83
6.2.- Metodologia Utilizada.	84
6.3.- Resultados Obtidos.	95
6.4.- Conclusões.	108
7.- Harmônicos e Filtros CC.	109
7.1.- Introdução.	109
7.2.- Metodologia, Critérios e Premissa.	110
7.3.- Procedimento do Estudo.	115
7.4.- Dados Utilizados.	118
7.5.- Resultados Obtidos.	122
7.6.- Conclusões.	125
8.- Análise Econômica da ECS.	127
8.1.- Introdução.	127
8.2.- Itens Relevantes nos Custos da ECS.	128
8.3.- Base de Custos.	129

8.4.- Comparação de Alternativas.	130
8.5.- Conclusões.	133
9.- Conclusões Finais e Sugestões para Futuros Trabalhos. .	135
9.1.- Conclusões Finais.	135
9.2.- Sugestões para Futuros Trabalhos.	137
10.- Referências.	139
Apêndice A.	141
Apêndice B.	145
Apêndice C.	155
Apêndice D.	156

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Dados Básicos para Dimensionamento da ECS.	67
QUADRO 2 - Corrente CC e Avaliação da Carga da ECS. . .	68
QUADRO 3 - Casos Extremos com Corrente CC Mínima.	71
QUADRO 4 - Casos Extremos com Corrente CC Máxima.	72
QUADRO 5 - Região Operativa da ECS.	73
QUADRO 6 - Especificação Básica da ECS	74
QUADRO 7 - Especificação do Compensador Síncrono.	81
QUADRO 8 - Fatores de Ponderação de Interferência Telefônica.	93
QUADRO 9 - Dados Referentes ao Sistema CC.	96
QUADRO 10 - Pontos de Operação Simulados.	97
QUADRO 11 - Dados Referentes ao Sistema CA Terminal. . . .	98
QUADRO 12 - Máximas Correntes Harmônicas Calculadas.	99
QUADRO 13 - Carga Conectada à ECS.	100
QUADRO 14 - Parâmetros do Compensador Síncrono.	103
QUADRO 15 - Critérios de Desempenho Para Harmônicos CA. . .	103
QUADRO 16 - Características dos Filtros CA.	104
QUADRO 17 - Índices de Desempenho dos Filtros CA.	106
QUADRO 18 - Índices de Desempenho dos Filtros CA.	107
QUADRO 19 - Harmônicos CC Lista de Casos Estudados.	116
QUADRO 20 - Harmônicos de Tensão Calculados (Volts).	123
QUADRO 21 - Avaliação de Preços da ECS.	131
QUADRO 23 - Comparação Econômica.	132
QUADRO B.1 - Dados de Entrada	146

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - Diagrama Esquemático de um Sistema CCAT Ponto-a-Ponto.	10
FIGURA 2 - Diagrama Simplificado de um Sistema CAAT.	11
FIGURA 3 - Sistemas CCAT x CAAT: Custos.	14
FIGURA 4 - Sistemas MTCC: a) Conexão em Paralelo. b) Conexão em Série.	18
FIGURA 5 - Sistema MTCC Sardenha/Córsega/Italia.	19
FIGURA 6 - Sistema MTCC Quebec/New England.	20
FIGURA 7 - Equipamentos da Estação Conversora CCAT.	22
FIGURA 8 - Distribuição de Custos na Estação Conversora.	25
FIGURA 9 - Distribuição de Perdas em uma Estação Conversora.	26
FIGURA 10 - Diagrama Unifilar da Estação Conversora Série.	35
FIGURA 11 - Estação Conversora Série.	35
FIGURA 12 - Estação Conversora Série de Comutação Natural.	40
FIGURA 13 - Região Operativa Típica.	54
FIGURA 14 - Fluxograma para Cálculo de Tape e r	58
FIGURA 15 - Região Operativa da ECS.	70
FIGURA 16 - Região Operativa Complementar da ECS.	76
FIGURA 17 - Barramento CA da ECS.	77
FIGURA 18 - Modelo Circular.	88
FIGURA 19 - Filtro Passa-Faixa.	89
FIGURA 20 - Filtro Passa-Alta.	90
FIGURA 21 - Circuito para Estudo de Distorções Harmônicas.	93
FIGURA 22 - Modelo da Carga da ECS.	100
FIGURA 23 - Curva Carga x Freqüência.	101
FIGURA 24 - Diagrama Circular. $r_1=0,743\Omega$; $r_2=31,71\Omega$; $\theta=71,8^\circ$	102
FIGURA 25 - Modelo de um Conversor de 6 Pulsos para Estudo de Harmônicos CC.	111

LISTA DOS PRINCIPAIS SÍMBOLOS UTILIZADOS

u_a, u_b, u_c	- tensões senoidais fase-neutro que alimentam a ponte conversora (kV).
U_i	- valor de pico das tensões fase-neutro que alimentam a ponte conversora (kV).
U_n	- valor rms das tensões fase-neutro que alimentam a ponte conversora (kV).
U_d	- tensão CC no terminal da conversora (kV).
U_{dio}	- tensão CC ideal a vazio (kV).
I_d	- corrente CC (kA).
P_d	- potência nominal fornecida pela conversora (MW).
Q_d	- potência reativa consumida pela conversora (MVar).
S	- potência aparente (MVA).
α	- ângulo de disparo das válvulas ($^{\circ}$).
μ	- ângulo de comutação ($^{\circ}$).
τ	- ângulo de extinção ($^{\circ}$).
ϕ	- ângulo do fator de potência ($^{\circ}$).
Tap	- posição do LTC do transformador conversor, situado no enrolamento ligado ao barramento CA.
L_k	- indutância de dispersão do transformador conversor (H).
x_t	- reatância do transformador conversor (Ω).
x_c	- reatância de comutação (Ω).
d_r	- queda de tensão relativa indutiva (pu).
n	- índice indicativo de valores nominais.

Resumo.

Estudos de planejamento de sistemas de transmissão, que envolvam o transporte de grandes blocos de energia por grandes distâncias, devem considerar alternativas em corrente contínua na busca da solução mais apropriada. Dentro deste contexto emerge a questão sobre a viabilidade técnica e econômica da alimentação de pequenas cargas ao longo das linhas.

Ressalta-se que esta é uma situação típica da região amazônica, onde as fontes de energia disponíveis situam-se, em muitos casos, distantes dos centros de carga predominantes. Desta forma, os sistemas de transmissão associados devem, preferencialmente, seguir rotas de rodovias existentes, cruzando pequenas cidades e vilas, conseqüentemente.

As estações conversoras série, que como o nome sugere, são pequenas conversoras em série com a linha de transmissão, têm se configurado como a forma mais adequada para a alimentação de pequenas cargas a partir de elos CCAT, embora nenhum esquema deste tipo tenha sido até hoje implementado.

A necessidade de uma diretriz para estudos de planejamento resultou em uma metodologia, desenvolvida neste trabalho, que permite a especificação de uma estação conversora série (ECS) de comutação natural, incluindo a definição de parâmetros básicos como ângulo de extinção, faixa dos comutadores sob carga, nominais dos transformadores conversores e consumo de potência reativa. A metodologia em questão considera, também, todos os aspectos práticos e limitações envolvidos em um projeto desta natureza.

Adicionalmente, a metodologia desenvolvida é aplicada na especificação de uma ECS destinada ao suprimento de uma carga de 25MW, a partir de um elo de corrente contínua com tensão e potência nominais de 350 kV e 500 MW por pólo, respectivamente. Os filtros CA e o compensador síncrono foram também avaliados, complementando a definição dos equipamentos principais.

Mostra-se ainda uma análise econômica que estima os custos da ECS, com base nos equipamentos previamente definidos. Estes custos são comparados com geração térmica local.

Abstracts.

Power Systems planning studies should consider HVDC alternatives, mainly when long distances are involved. On this context emerges the question about the economical and technical viability of supplying small loads along the lines.

This situation is typical in the Amazonical Region, where the available energy sources, in many cases, are situated very far from the predominant load centers. So that the associated transmission systems follow existing roads, crossing small cities and villages consequently.

Series converter stations, installed in series with the line, has been thought as the most suitable way for small loads supplies from HVDC links, although these schemes have never been implemented.

Looking for an answer that could orient planning studies, this work deals with a methodology for the calculations comprised in a natural commutated series converter station (SCS) design, which allows for the basic parameters determination, including extinction angle and tap changer ranges, converter transformer ratings and reactive power demand. This methodology takes into account all factors, practical aspects and limitations involved in such a study.

This work also shows the above mentioned method applied to a 25 MW SCS to supply a small load from an HVDC link rated at 350 KV and 500 MW per pole. The AC filters and the synchronous compensator were also evaluated, concluding the main equipments basic

specification.

Additionally an economical analysis is presented to estimate the SCS costs based on the calculated equipment. These costs were compared to a local thermal generation alternative.

1.- Introdução.

Os sistemas de transmissão em corrente contínua de alta tensão (CCAT) têm, como função básica, o transporte de energia elétrica entre dois ou mais sistemas de corrente alternada (CA). Para tal é feita, inicialmente, a conversão CA/CC na estação conversora retificadora, ou simplesmente retificador, localizada no sistema CA emissor de potência. A transmissão é então realizada por linhas aéreas ou cabos até o terminal receptor, onde se processa a conversão CC/CA, através da estação conversora inversora, ou simplesmente inversor.

A tecnologia CCAT viabilizou a transmissão de grandes blocos de energia por longas distâncias, o que é uma limitação da transmissão CA convencional. Isto se deveu ao desenvolvimento das conversoras de estado sólido a tiristores, à ausência de limitações técnicas relacionadas ao comprimento das linhas de corrente contínua, e ao baixo custo destas últimas, em comparação às linhas de corrente alternada.

Entretanto, esta não é a única aplicação da tecnologia CCAT. As interligações assíncronas entre sistemas CA com diferentes frequências de operação são realizadas pelas estações conversoras "back-to-back", nas quais o retificador e o inversor são diretamente conectados.

Uma outra importante utilização são as transmissões marítimas via cabo. O primeiro sistema CCAT deste tipo entrou em operação no ano de 1954. Trata-se da conhecida interligação entre a ilha de Gotland e o continente sueco, com 100 km de extensão. O desenvolvimento e

comissionamento deste projeto pioneiro deram impulso às transmissões CCAT modernas de grande porte, que hoje contam com diversas aplicações em todo o mundo.

A maioria dos sistemas CCAT existentes são do tipo ponto-a-ponto, ou seja, possuem dois únicos terminais, sendo um retificador e outro inversor. Contudo, o desenvolvimento recente de controles rápidos e sofisticados permitiu que a tecnologia CCAT fosse estendida a sistemas com múltiplos terminais, conhecidos como sistemas multiterminais de corrente contínua (MTCC).

Dentro do contexto da transmissão de grandes blocos de energia por grandes distâncias, através de sistemas de corrente contínua, emerge a questão da drenagem da alimentação de pequenas cargas no curso das linhas. Tais sistemas longos possuem, em muitos casos, rotas que preferencialmente seguem rodovias existentes, cruzando pequenas cidades, vilas e outros tipos de cargas menores.

Um sistema MTCC poderia ser utilizado para drenar potência em vários pontos ao longo de uma rota de transmissão, desde que as porções de potência a serem retiradas justificassem economicamente o investimento nas conversoras intermediárias. Entretanto, o alto custo associado às estações de corrente contínua torna inviável tal tipo de aplicação, principalmente quando as cargas que se deseja suprir são muito menores que a potência para a qual a transmissão principal foi projetada.

Dentre as soluções apontadas na bibliografia especializada para o suprimento de pequenas cargas, a que tem se mostrado mais adequada é a pequena estação conversora série (ECS), instalada em série com

a linha de transmissão.

Embora existam várias propostas para a implementação de ECS, diferentes entre si principalmente no que se refere à técnica a ser utilizada para a conversão CC/CA, nenhuma instalação para a drenagem de pequenas potências foi construída até hoje. Na verdade muitas investigações, pesquisas e desenvolvimentos tecnológicos precisam ainda ser feitos neste campo.

O estado da arte das conversoras de corrente contínua com válvulas tiristorizadas permite a sua aplicação em pequenas ECS. Contudo, é de se esperar o surgimento, em médio prazo, de novos dispositivos de comutação forçada que conduzam a uma solução ótima em termos de custo, e com o mesmo desempenho atualmente alcançado pelas conversoras de corrente contínua convencionais.

O presente trabalho propõe uma metodologia para o dimensionamento de uma estação conversora série (ECS). A metodologia desenvolvida é aplicada a um caso prático, caso este que faz parte de estudos de planejamento realizados pela ELETRONORTE.

O segundo capítulo deste trabalho traz uma análise da transmissão em corrente contínua em seus aspectos mais relevantes, culminando com o suprimento de pequenas cargas ao longo das linhas. Para este último tópico reservou-se um capítulo único, o terceiro, abordando detalhadamente o problema e as suas possíveis soluções.

A metodologia mencionada anteriormente baseia-se na determinação das "regiões operativas da ECS", e da configuração da estação, tomando como premissas o comportamento da corrente do elo principal

e as flutuações da pequena carga a ser suprida. Seu desenvolvimento é o conteúdo do quarto capítulo. A aplicação prática, também já referida, é abordada em detalhes no quinto capítulo.

Dando prosseguimento aos estudos práticos de dimensionamento da ECS, é feita, no sexto capítulo, uma avaliação dos harmônicos de corrente CC gerados pela ECS, sendo definidos os filtros necessários para evitar distorções e interferências causadas por estes harmônicos.

Uma análise dos harmônicos de tensão CC é feita no capítulo sétimo, abordando, qualitativamente, os aspectos nocivos que tais harmônicos podem trazer ao sistema CC principal e as formas de filtragem mais eficazes.

O oitavo capítulo dedica-se ao levantamento dos custos da ECS em estudo. É também realizada uma análise comparativa com a alternativa de suprimento da pequena carga por meio de geração diesel local.

Finalmente, no nono capítulo, são destacadas as principais conclusões e recomendações do trabalho, visando futuras pesquisas e investigações complementares.

2.- Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua - Aspectos Gerais.

2.1.- Introdução.

As aplicações da corrente contínua surgiram com a própria história da eletricidade. As descobertas de Galvani, Volta, Oersted e Ampère, pertencem à corrente contínua, cuja primeira utilização prática foi a telegrafia.

A primeira central elétrica em funcionamento no mundo, construída pelo conhecido inventor e empresário americano Thomas A. Edison, entrou em operação no ano de 1882, na cidade de New York. Esta estação, constituída por geradores de corrente contínua (CC), supria parte da cidade através de uma rede de corrente contínua, a uma tensão de 110 V. Em poucos anos vários outros sistemas como este estariam fornecendo energia elétrica aos grandes centros urbanos do mundo.

O advento do transformador, dos circuitos polifásicos e do motor de indução, ocasionou a quase total substituição da corrente contínua pela corrente alternada. Tais equipamentos possibilitaram o uso de diferentes níveis de tensão, para geração, transmissão e distribuição de energia. Tornou-se, então, viável a exploração da energia hidráulica, geralmente disponível a uma grande distância dos centros consumidores. Para a corrente contínua restaram apenas algumas poucas aplicações de baixa tensão, como a tração elétrica nas grandes cidades.

A primeira aplicação da corrente contínua em alta tensão teve como

responsável o engenheiro francês René Thury, nos primórdios da corrente alternada, ou seja no final do último século. A idéia de Thury foi a de conectar em série vários geradores CC, de forma a obter a tensão a ser utilizada na transmissão.

Até o ano de 1911 havia cerca de 19 sistemas como este em operação na Europa, sendo que o maior deles ligava Mountier a Lyons, na França, e permaneceu em operação até 1937, percorrendo uma distância de 225 km, com uma potência nominal de 19,3 MW na tensão de 125 kV.

O desenvolvimento das válvulas de arco-a-mercúrio para aplicações de corrente contínua em alta tensão (CCAT) teve início durante a segunda guerra mundial, na União Soviética e na Suécia. Foram os suecos, entretanto, que no ano de 1954 comissionaram o primeiro sistema comercial de transmissão em corrente contínua, utilizando válvulas de mercúrio. Trata-se da interligação entre a ilha de Gotland e o continente sueco, realizada pela empresa Allmanna Svenska Elektriska Aktiebolaget (ASEA), sob o comando do engenheiro Uno Lamm.

O sistema de Gotland, com 96 km, transmitia originalmente 20 MW com a tensão operacional de 100 kV, através de um cabo simples com retorno pelo mar. Esta alternativa mostrava-se mais econômica que a instalação adicional de geração térmica local, e a distância envolvida era muito grande para transmissão em corrente alternada (CA) via cabos. Cabe ressaltar que a interligação de Gotland permanece em operação (1991).

Nove outros sistemas CCAT, utilizando válvulas de arco-a-mercúrio,

foram construídos posteriormente, sendo o último deles o de Nelson River, em Manitoba, com potência nominal de 1620 MW e tensão de ± 450 kV, comissionado em 1973.

No final da década de 60, o rápido desenvolvimento da técnica dos tiristores tornou possível a substituição das válvulas de arco-a-mercúrio pelas válvulas de tiristores, o que representou um grande avanço tecnológico. Mais uma vez a interligação de Gotland foi pioneira, com a instalação, em 1970, do segundo polo, utilizando válvulas de tiristores, formando-se assim um sistema híbrido. A partir de então um grande número sistemas CCAT, exclusivamente com válvulas de tiristores, tem sido comissionado.

2.2.- Aplicações da Tecnologia CCAT.

Existem dois casos distintos em que a tecnologia CCAT pode ser cogitada como uma alternativa de transmissão atrativa, dos pontos de vista técnico e econômico. Uma breve descrição de cada um destes casos é feita a seguir, ficando, para o próximo item deste capítulo, a apresentação de uma comparação mais detalhada entre sistemas de transmissão de corrente contínua em alta tensão (CCAT) e corrente alternada em alta tensão (CAAT).

O primeiro dos casos é a transmissão de grandes blocos de energia a longas distâncias. Nestes casos, a escolha de sistemas CCAT deve-se a razões estritamente econômicas, ditadas pelo preço das linhas de transmissão. Poderiam ser também enquadrados neste caso as transmissões de energia para ilhas, via cabos subaquáticos, economicamente justificadas quando comparadas com geração local,

embora os níveis de potência envolvidos sejam muitas vezes pequenos.

Inúmeros são os exemplos de transmissões de grandes blocos de energia CCAT em operação , como os sistemas da Nova Zelândia, Interligação do Pacífico ("Pacific Intertie"), Itaipu e Nelson River, sendo que este último projeto teve como razão adicional alguns problemas de estabilidade dinâmica no sistema CA receptor de Winnipeg.

O segundo caso de aplicação da tecnologia CCAT são as interligações de sistemas de potência independentes, cujas vantagens e benefícios são bastante conhecidos. A diferença de custo entre gerações hidráulicas, nucleares, carvão e óleo, bem como a diversidade diária e sazonalidade das cargas são algumas das justificativas para a interconexão de sistemas.

Diversas interligações CC em operação no mundo, na faixa de potência de 200 a 2000 MW, nas quais as instalações CC, incluindo cabos subaquáticos ou linhas, representam um investimento menor que a construção de nova usina, para suprimento de ponta de carga.

Muitas das interligações CC entre sistemas vizinhos são efetuadas em uma única subestação, portanto, sem linha de transmissão. São os chamados sistemas "back-to-back". As interligações CC, por serem assíncronas, permitem a ligação de sistemas com diferentes frequências, e não precisam ter grande capacidade de potência para garantir um bom controle de carga e frequência, e a estabilidade dos sistemas CA interligados. Outro benefício de grande importância é a habilidade da interligação CC em limitar a contribuição de

curto-circuito entre sistemas.

Como exemplos de interligações CC podem ser citados o conversor de frequência de Sakuma no Japão, a travessia do canal Inglaterra-França, o sistema Konti-Skan entre Suécia e Dinamarca, o sistema Skagerrak entre Noruega e Dinamarca, o sistema Fenno-Skan entre Suécia e Finlândia, o projeto de "Eel River" no Canadá, o sistema back-to-back de Uruguaiana, em construção entre o Brasil e a Argentina, e outros.

Também na área de distribuição de energia, a tecnologia CCAT vem sendo cogitada, principalmente nos grandes centros urbanos, onde são utilizados cabos alimentadores subterrâneos, e o crescimento da carga tem requerido um maior aproveitamento dos corredores de passagem. Nestes casos, a utilização de cabos CC pode ser mais econômica que os cabos CA, para distâncias envolvidas em torno de 80 km, e um nível de potência superior a 1000 MW. Tais limites se devem ao elevado custo dos equipamentos terminais. Atualmente um único projeto CCAT de distribuição está em operação no mundo. Trata-se do sistema de Kingsnorth, em Londres.

2.3.- Sistemas CCAT x CAAT: Vantagens e Desvantagens.

Os conversores CA/CC são elementos unidirecionais em corrente, permitindo o fluxo de corrente somente em um sentido, conforme ilustra a figura 1. Um conversor opera como retificador quando a potência é transmitida do lado CA para o lado CC. Através do controle de disparo das válvulas é possível inverter a polaridade da tensão no lado CC, fazendo com que a potência flua em sentido

oposto, ou seja, para o lado CA. Um conversor operando desta forma é chamado inversor.

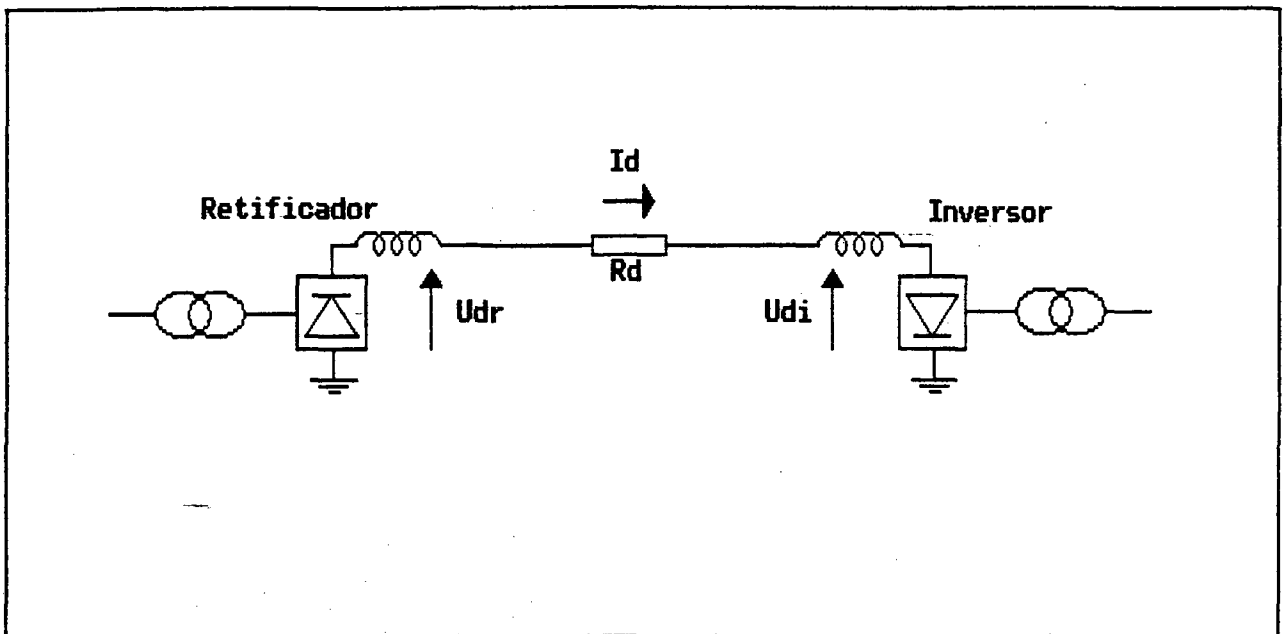


FIGURA 1 - Diagrama Esquemático de um Sistema CCAT Ponto-a-Ponto.

A corrente contínua I_d é determinada pelas tensões terminais do retificador e do inversor, U_{dr} e U_{di} respectivamente, e pela resistência da linha R_d . Assim sendo, a potência ativa no inversor é dada por:

$$P_d = U_{di} (U_{dr} - U_{di}) / R_d \quad (1)$$

Para fazer uma análise comparativa simples, com sistemas CC, será usado o circuito equivalente CA mostrado na figura 2. As potências ativa e reativa são dadas pelas relações abaixo, onde δ e X são a defasagem angular e a reatância entre os terminais, respectivamente:

$$P_1 = P_2 = \frac{U_1 \cdot U_2 \cdot \sin \delta}{X} \quad (2)$$

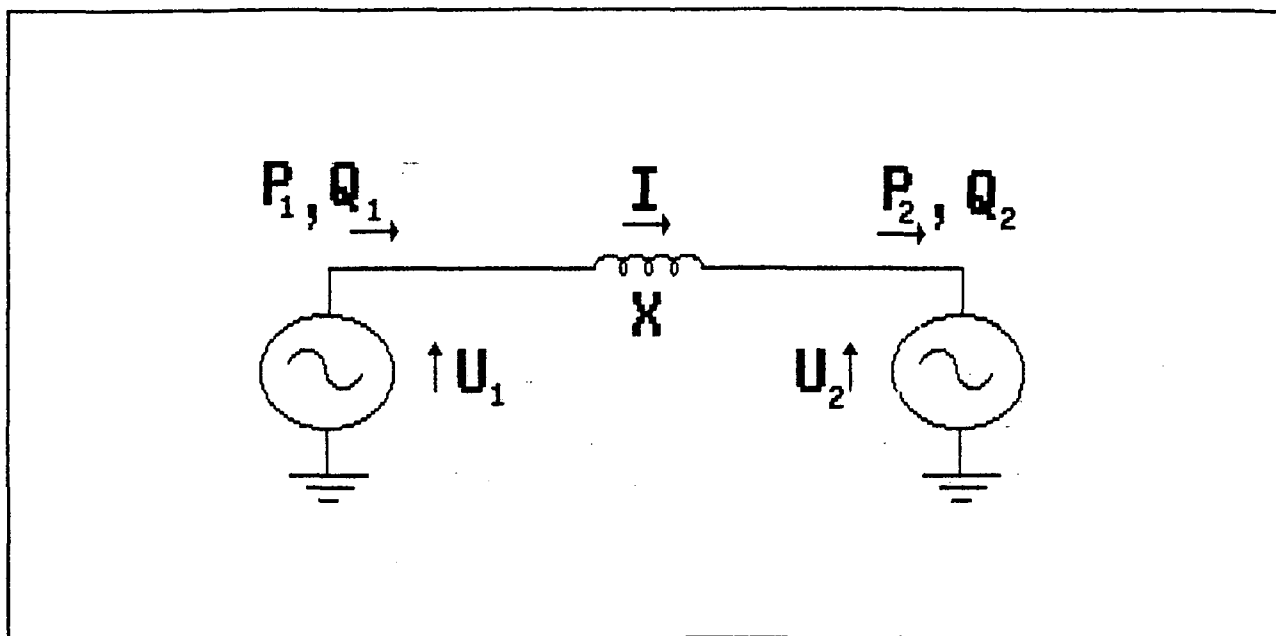


FIGURA 2 - Diagrama Simplificado de um Sistema CAAT.

$$Q_1 = \frac{U_1(U_1 - U_2 \cdot \cos \delta)}{X} \quad (3)$$

$$Q_2 = \frac{U_2(U_2 - U_1 \cdot \cos \delta)}{X} \quad (4)$$

Da equação (2) verifica-se que a potência máxima transmitida é inversamente proporcional ao comprimento da linha. Isto justifica a utilização de capacitores série em linhas aéreas longas, reduzindo-se, assim, a reatância total. Linhas não compensadas são normalmente restritas a um comprimento máximo em torno de 500 km, ao passo que a compensação aumenta este comprimento máximo para 1500 km.

Uma comparação entre as equações (1) e (2) mostra que a potência em uma transmissão CA é determinada pela defasagem angular entre os dois sistemas CA conectados, enquanto que para uma transmissão CC o fator determinante é a diferença de tensão CC entre os

extremos da linha. Portanto, um mérito das transmissões CA é esta capacidade de autocontrole da potência transmitida, com base apenas na diferença angular δ . Em outras palavras, as necessidades do sistema receptor são automaticamente sentidas pelo sistema emissor.

Para uma transmissão CC é necessário um controle específico e sofisticado que meça a defasagem angular entre os sistemas CA terminais e atue nas tensões contínuas dos conversores, controlando assim o fluxo de potência do elo. Tal controle pode também limitar o carregamento máximo da linha, evitando sobrecargas que, em uma interligação CA, conduzem à perda de estabilidade.

Como a potência transmitida através de um elo CC independe da defasagem angular ou das frequências dos sistemas CA terminais, não há necessidade que estes últimos sejam sincronizados, ou mesmo operem com frequências iguais. Muitos elos CC como as interligações Suécia-Dinamarca, Noruega-Dinamarca, Inglaterra-França e outros, exemplificam esta aplicação.

Em muitos casos, onde a potência transmitida pelo elo CC é suficientemente grande, é possível executar o controle de frequência de um dos sistemas CA terminais, como ocorre com o sistema pioneiro de Gotland. Uma outra aplicação bastante praticada é a estabilização de sistemas CA, utilizando a modulação da potência do elo CC, a partir de sinais como a própria frequência do sistema CA em questão.

De acordo com as equações (3) e (4), em caso de linhas CA curtas, a potência reativa é sempre transferida do terminal com maior

tensão para o de menor tensão. Entretanto, quando se trata de linhas longas, estas irão consumir potência reativa, caso estejam operando acima de seu carregamento natural. Neste caso é preciso fornecer potência reativa à linha, através de capacitores, ou outro meio qualquer. Por outro lado, quando o carregamento é inferior ao natural, há um excesso de potência reativa na linha, que muitas vezes tem que ser consumido por reatores. Portanto, equipamentos de controle de tensão são constantemente requeridos em tais sistemas.

Uma linha de transmissão CC nunca produz ou consome potência reativa. Contudo, os conversores atualmente usados em sistemas CCAT consomem grande quantidade de potência reativa, que na prática atinge a 50% da potência ativa transmitida pelo elo. Normalmente esta potência reativa é fornecida por bancos de capacitores e pelos filtros, instalados para mitigar as correntes harmônicas introduzidas na rede CA pelas conversoras.

Conclui-se, portanto, que em ambos os casos são necessários equipamentos de suporte de reativo para um controle efetivo das tensões dos sistemas CA terminais. A grande diferença, no entanto, é que o montante deste suporte, no caso de sistemas CC, independe do comprimento da linha, posto que o consumo de reativo das conversoras não é influenciado pela mesma. Para sistemas CA, o comprimento da linha é um fator determinante da quantidade de suporte de reativo a ser instalado.

Nas transmissões via cabo, a geração de potência reativa pela linha torna-se crítica para transmissões CA, mesmo quando se trata de pequenas distâncias, de forma que uma grande quantidade de

reatores precisa ser instalada ao longo da transmissão. Isto inviabiliza as travessias subaquáticas, se maiores que 30 km. Estas limitações não existem para travessias CC.

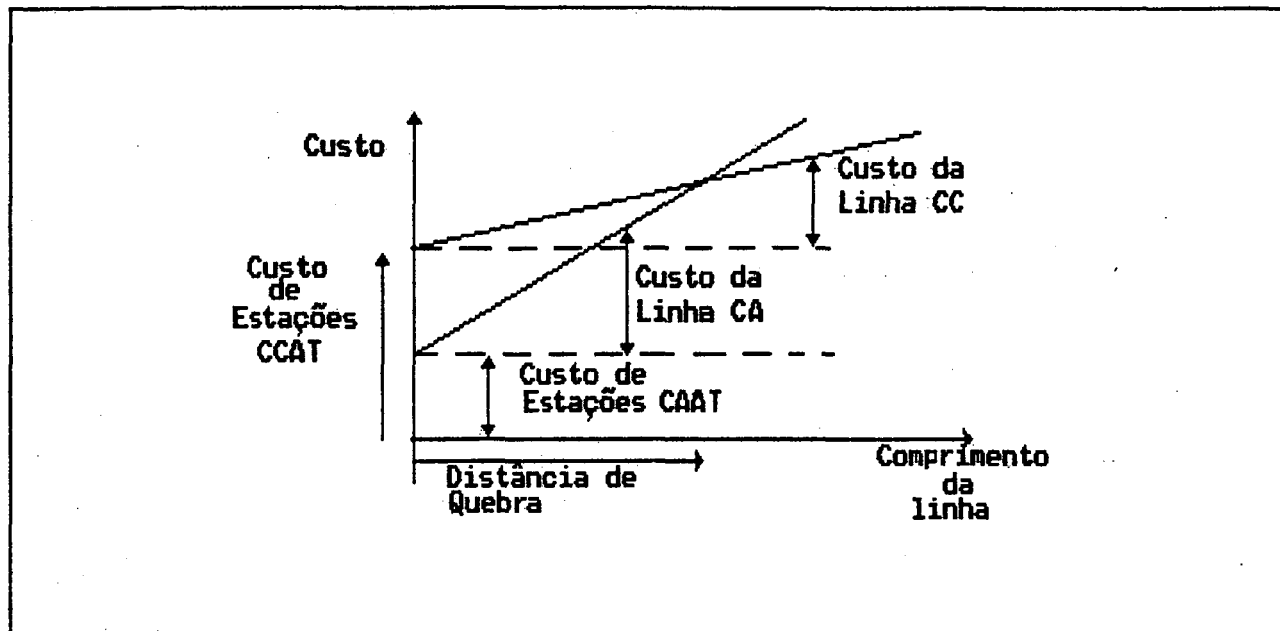


FIGURA 3 - Sistemas CCAT x CAAT: Custos.

A figura 3 ilustra a comparação de custos entre sistemas CA e CC. Nota-se que o custo por km das linhas de transmissão CC é menor que o das linhas CA. Entretanto, os custos dos equipamentos terminais de uma estação conversora são consideravelmente maiores que os custos das subestações terminais CA. Existe, portanto, um comprimento mínimo de linha a partir do qual os custos totais de um sistema CCAT, incluindo linha e equipamentos terminais, passam a ser menores do que os custos de um sistema CAAT equivalente. No caso de linhas aéreas este comprimento mínimo situa-se entre 500 e 1000 km, aproximadamente.

Há casos, entretanto, em que a questão da distância não influi na escolha entre transmissões CA ou CC. São as situações em que as redes terminais operam sem sincronismo ou em diferentes frequências, conforme mencionado anteriormente. Existem mesmo casos

em que não há necessidade de linhas, e os sistemas CA são conectados por uma estação conversora "back-to-back", onde o retificador e o inversor são instalados no mesmo local, separados apenas por um reator.

Uma vantagem de sistemas CCAT, já comentada neste capítulo, é o fato destes não contribuírem para a potência de curto-circuito da rede CA. Entretanto, este fator não é decisivo na seleção da tecnologia CCAT. Pelo contrário, uma certa potência de curto-circuito é necessária ao correto funcionamento das conversoras. Por isto, em muitos casos, devem ser instalados compensadores síncronos nas estações CCAT, aumentando-se assim a potência de curto-circuito das redes fracas. Estes compensadores são também utilizados no suprimento da potência reativa requerida.

Um outro aspecto que precisa ser mencionado é a questão da disponibilidade e confiabilidade. O desenvolvimento das estações conversoras, nas últimas duas décadas, conduziu a simplificações e melhoras que elevaram, substancialmente, a confiabilidade dos sistemas CCAT.

Um dos fatores que contribuiu para a elevação dos níveis de confiabilidade e disponibilidade é a capacidade de sobrecarga dos elos CC durante contingências. Por um acréscimo marginal no custo da instalação pode-se elevar bastante esta capacidade. O sistema americano do IPP, que supre Los Angeles, admite sobrecarga de 100% em um dos polos, no caso da perda do outro polo, por seis segundos, após o que a sobrecarga admitida é de 50%.

Após esta breve análise comparativa é possível destacar as

seguintes qualidades aplicativas de um sistema CCAT:

- Capacidade de transmitir grandes blocos de energia sem limitações quanto à distância a ser coberta.
- Facilidade, flexibilidade e rapidez de controle da potência transmitida.
- Possibilidade de interligar sistemas CA não sincronizados, ou mesmo com frequências de operação diferentes.
- Possibilidade de execução de transmissões via cabo.
- Baixo custo das linhas de transmissão.

As maiores desvantagens de um sistema CCAT são:

- Elevado custo das estações conversoras especialmente das válvulas tiristorizadas e dos transformadores que devem ser mais robustos que os transformadores convencionais e portanto não podem ser admitidas simplificações, como o uso de auto-transformadores na maioria das instalações.
- Necessidade de filtros, tanto no lado CA como no lado CC da estação conversora, para evitar distorções e interferências causadas pelos harmônicos gerados no processo de conversão CA/CC.
- Necessidade de instalação de compensadores síncronos para

e elevar a potência de curto-circuito dos sistemas CA terminais fracos.

2.4.- Sistemas Multiterminais de Corrente Contínua.

Até agora este trabalho só fez referência detalhada a sistemas de transmissão em corrente contínua com dois terminais, conhecidos como sistemas ponto-a-ponto.

A possibilidade de construção de sistemas de transmissão em corrente contínua, utilizando arranjos multiterminais (MTCC), vem sendo estudada desde a época do comissionamento do primeiro sistema CCAT, no ano de 1954.

A grande limitação tecnológica que impedia a realização de tais sistemas era a indisponibilidade de disjuntores que pudessem interromper a corrente contínua. Muito se investiu no desenvolvimento de disjuntores CC, principalmente na década de 70.

Entretanto, estudos em simuladores analógicos de sistemas CC mostraram não ser esta uma barreira intransponível, posto que, com o desenvolvimento de controles digitais ultra rápidos era possível interromper a corrente usando os próprios conversores. Atualmente os sistemas MTCC são uma realidade, já havendo um em operação, outro em comissionamento e vários em fase de planejamento, sendo que nenhum deles contempla a utilização de disjuntores de corrente contínua.

As conversoras, em um sistema MTCC, podem ser conectadas em série

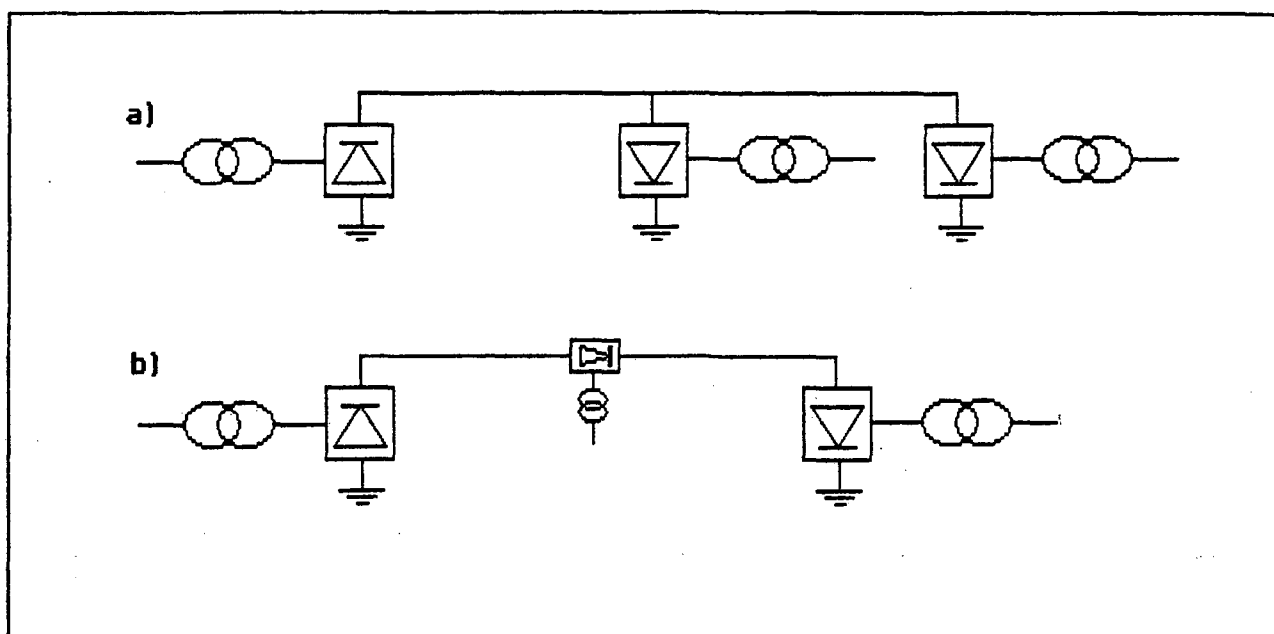


FIGURA 4 - Sistemas MTCC: a) Conexão em Paralelo.
b) Conexão em Série.

ou em paralelo, conforme ilustra a figura 4. Na conexão série, a corrente através das conversoras é a mesma e a tensão CC terminal de cada uma delas dependerá da potência a ser retirada ou injetada na linha. Este tipo de conexão tem sido considerado apenas para drenagem de pequenas potências, e é o objeto principal deste trabalho.

Na conexão em paralelo, a tensão terminal de cada conversora é a tensão nominal da rede, sendo que, neste caso, a corrente de cada uma delas dependerá da potência a ser retirada ou injetada na linha.

O primeiro sistema multiterminal de corrente contínua no mundo entrou em operação no ano de 1987. Trata-se do sistema SACOI (Sardenha-Córsega-Itália), derivado de um antigo sistema ponto-a-ponto que supria a Sardenha a partir do continente italiano.

O sistema SACOI, apresentado na figura 5, é monopolar, com tensão

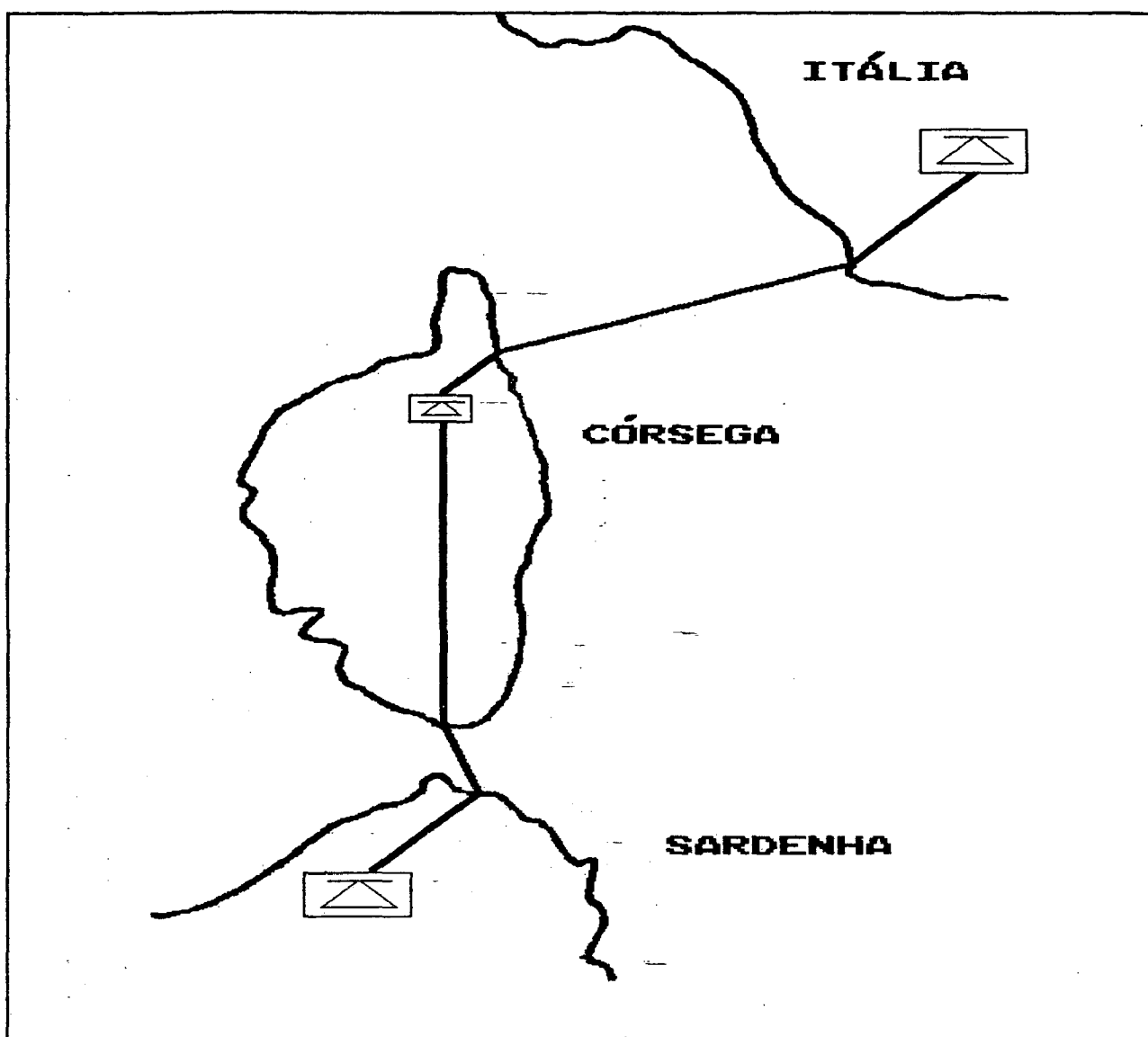


FIGURA 5 - Sistema MTCC Sardenha/Córsega/Italia.

nominal de 200 kV e retorno pela terra e mar. A corrente nominal, na transmissão principal é de 1000 A. Os conversores principais são especificados para 200 MW, sendo formados por duas válvulas de arco de mercúrio de 100 kV cada, conectadas em série. A estação conversora de 50 MW instalada na Córsega, mais especificamente na localidade de Lucciana, é formada por duas válvulas de tiristores de 100 kV cada, também conectadas em série.

Um outro grande projeto MTCC encontra-se em comissionamento. Trata-se do sistema Quebec-New England, que interliga os Estados Unidos e o Canadá, sendo composto por cinco pontos de conversão

CA/CC. O projeto amplia uma interligação ponto-a-ponto existente, e tem como principal motivação um contrato de suprimento de 2000 MW, no sentido Canadá-EUA, por um período de dez anos. O diagrama eletrogeográfico do sistema em questão é mostrado na figura 6.

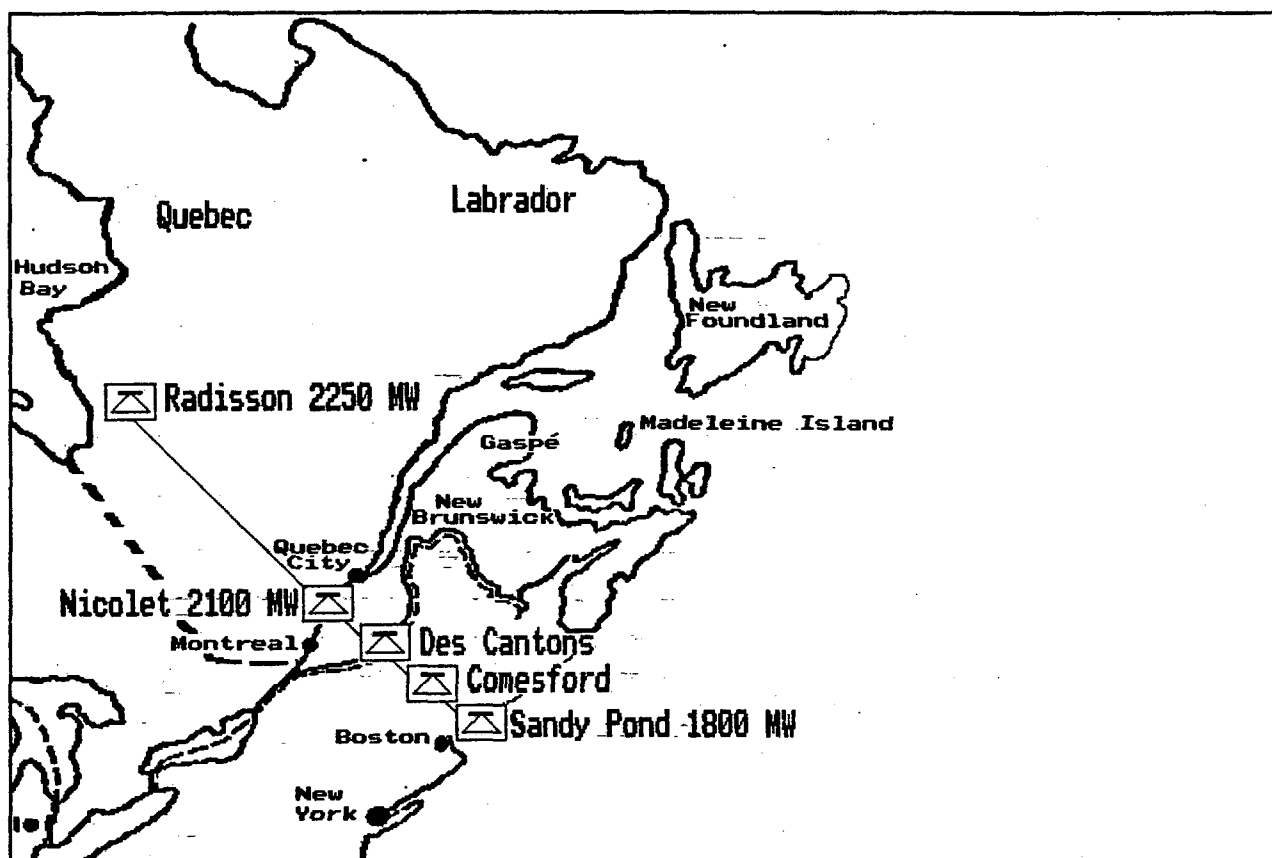


FIGURA 6 - Sistema MTCC Quebec/New England.

Em sua fase inicial o projeto se resumia a um sistema bipolar de 450 kV e 690 MW, conectando as estações de Des Cantons (Canadá) e Comerford (EUA), distantes 172 km. Esta fase entrou em operação no ano de 1986.

A fase seguinte do projeto inclui a expansão da transmissão para outros três terminais. No Canadá, a estação de Des Cantons foi ligada, em 1990, ao complexo gerador de Radisson, distante 1100 km, ali prevendo-se uma conversora de 2250 MW. Nos EUA o projeto se estenderá, na direção sul, onde será construído o terminal de Sandy

Pond de 1800 MW, a 214 km de Comerford. O quinto e último terminal situado em Nicolet, no Canadá, com 2100 MW, está previsto para 1992.

2.5.- Equipamentos da Estação Conversora.

Como parte deste capítulo sobre aspectos gerais serão apresentados agora os diversos equipamentos que compõem uma estação conversora e os respectivos custos relativos.

Como já foi visto, a maioria dos sistemas CCAT são bipolares, sendo que cada polo é projetado para operar independentemente do outro, de forma a melhorar a confiabilidade do sistema como um todo. Por esta razão cada estação conversora é dividida em duas partes idênticas, constituindo, cada uma, um polo. Apenas alguns equipamentos da estação são comuns aos dois polos. São eles os filtros CA, os equipamentos de suporte de reativo, a barra de neutro, que faz a conexão dos dois polos com o eletrodo de terra, e os equipamentos a ela conectados.

A figura 7 apresenta os principais equipamentos da estação conversora, cujas características serão brevemente descritas a seguir:

- **Válvulas Tiristorizadas:** utilizadas em estações CCAT desde 1970, em substituição às válvulas de arco de mercúrio, são compostas basicamente pelos tiristores, elementos eletrônicos utilizados na conversão CA/CC.

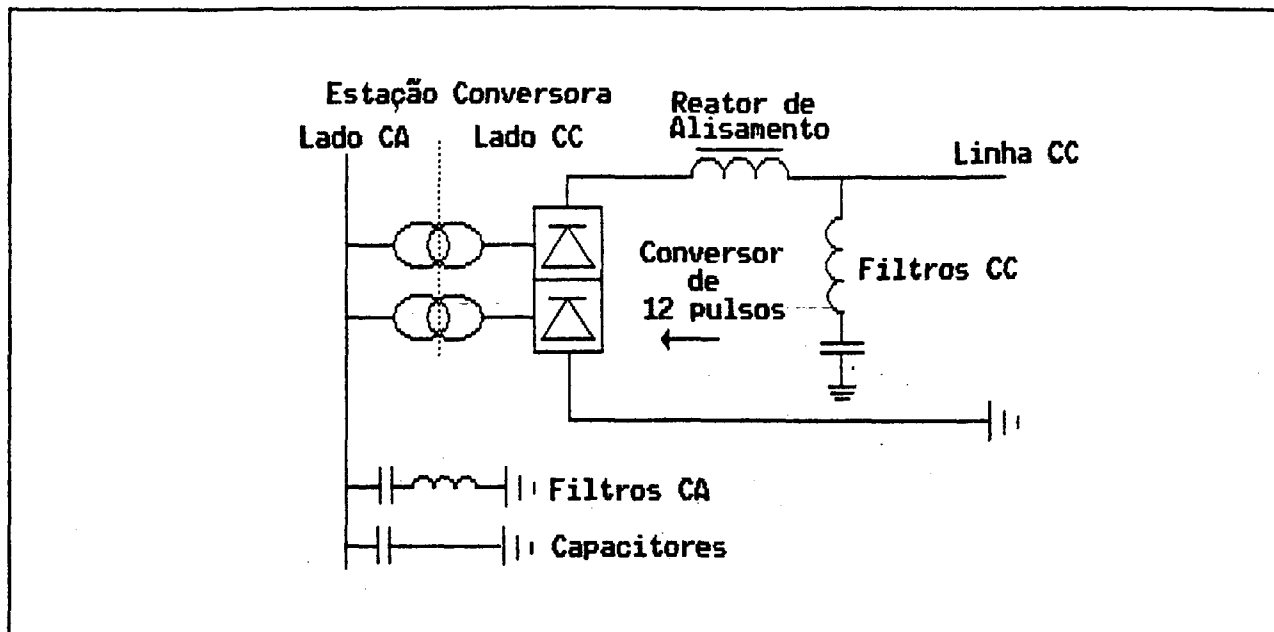


FIGURA 7 - Equipamentos da Estação Conversora CCAT.

As válvulas são agrupadas em pontes conversoras. Estas pontes são identificadas pelo número de pulsos ou sinais de disparo gerados pelo controle de cada unidade, por ciclo, o qual é idêntico ao número de válvulas componentes. Assim, uma ponte de seis pulsos é composta por seis válvulas ou conjuntos de tiristores.

Comumente cada polo da estação conversora utiliza pontes de doze pulsos, constituídas pela associação de duas unidades de seis pulsos. Tal configuração permite a elevação da tensão CC de transmissão e da redução significativa do conteúdo harmônico injetado nas redes CA e CC pelas conversoras.

Além dos tiristores, as válvulas contêm circuitos de equalização estática e dinâmica, mais conhecidos como circuitos de ajuda à comutação ou "snubbers", o sistema de refrigeração, que geralmente utiliza a água desionizada como fluido de arrefecimento, e a própria estrutura mecânica.

- **Transformadores Conversores:** diferem dos transformadores utilizados em instalações CA convencionais por serem maiores e mais robustos, face às solicitações a que são submetidos, oriundas de fortes componentes harmônicos na corrente que circula em seus enrolamentos. Estas solicitações exigem a utilização de grande quantidade de isolante sólido (papel), no interior dos transformadores, além de um sistema de refrigeração mais eficiente.

Cada conversor de doze pulsos utiliza dois transformadores, cujos enrolamentos ligados ao barramento CA são normalmente conectados em estrela e triângulo, respectivamente, de forma a anular os harmônicos de corrente múltiplos de seis.

- **Reatores de Alisamento:** também conhecidos como reatores CC, são conectados em série com as pontes conversoras. As duas funções básicas destes reatores são a redução das ondulações da corrente contínua ("ripple") e a redução dos transitórios de corrente durante faltas. Possuem uma indutância que varia de 0,3 a 0,7 H e podem ser encontrados imersos em tanques de óleo, ou, em projetos mais recentes, como reatores de núcleo de ar.

- **Filtros:** encontrados tanto no lado CA como no lado CC da estação, para a filtragem dos harmônicos gerados pelos conversores. Os filtros CA, formados por capacitores e reatores de núcleo de ar, cumprem também a função de gerar parte da potência reativa requisitada pelos conversores, sendo portanto capacitivos na frequência fundamental. Os filtros CC são consideravelmente menores que os filtros CA,

não sendo utilizados em transmissões a cabo e "back-to-back".

- Equipamentos de Controle: as estações conversoras são providas de um avançado sistema de controle, proteção e monitoramento. A maior parte desses equipamentos é localizada na sala de controle, localizada na própria estação, embora as pequenas estações possam ser remotamente controladas.

A unidade básica do sistema de controle é o controlador de disparo das válvulas. A coordenação do controle entre as diversas estações é feita através de canais de telecomunicações, sendo que a indisponibilidade destes canais não causam o colapso do sistema, mesmo nos sistemas multiterminais.

A corrente do sistema CCAT é controlada de forma que os requisitos de carga sejam supridos, além da possibilidade do controle da frequência da rede CA conectada ao inversor e da estabilização dos sistemas CA terminais.

A ação rápida dos equipamentos eletrônicos de proteção e controle evitam grandes sobrecorrentes. Em caso de faltas na linha-CC, por exemplo, a proteção atua no sentido de desenergizar a linha, em poucos milisegundos, sendo que a reenergização do sistema é geralmente alcançada entre 300 e 500 milisegundos após a eliminação do defeito.

Além dos equipamentos mencionados anteriormente, cada polo da

estação conversora possui ainda pára-raios contra sobretensões, diferentes tipos de chaves, além de dispositivos de medição.

2.6.- Distribuição de Custos na Estação Conversora.

A figura 8 fornece uma distribuição típica dos custos de uma estação conversora CCAT. Pelo que pode ser visto os transformadores e reatores de alisamento constituem os elementos de maior peso, com 25% do custo total. A seguir aparecem as válvulas, cujo custo se situa na faixa de 15 a 25%. Os custos dos filtros e capacitores somam 10% da instalação, enquanto que os demais equipamentos como pára-raios, buchas e chaves representam outros 10%. Os custos dos equipamentos de controle e proteção, incluindo geração auxiliar, normalmente não ultrapassam 5% dos custos totais.

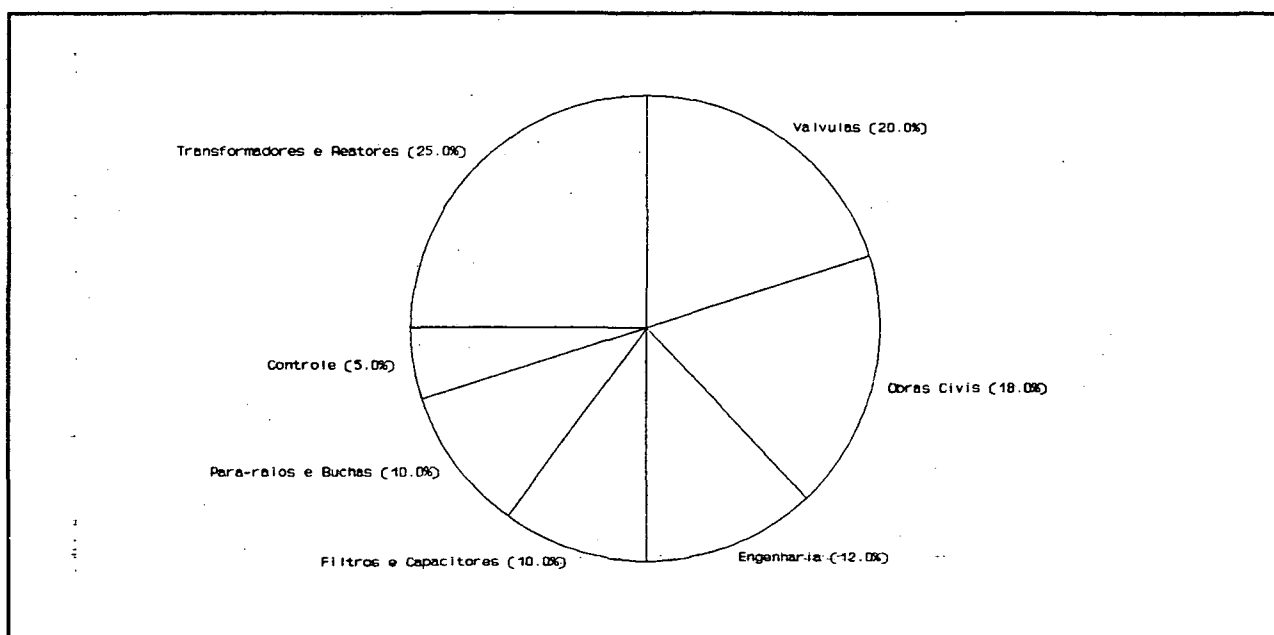


FIGURA-8 - Distribuição de Custos na Estação Conversora.

Um outro aspecto relevante é a distribuição das perdas em uma estação conversora, mostrada na figura 9. É possível notar que as

perdas nos transformadores e nas válvulas mantem a mesma relação que seus custos. Todavia, o desenvolvimento da tecnologia de semicondutores poderá reduzir tanto os custos como as perdas das válvulas, o que não é esperado para os transformadores.

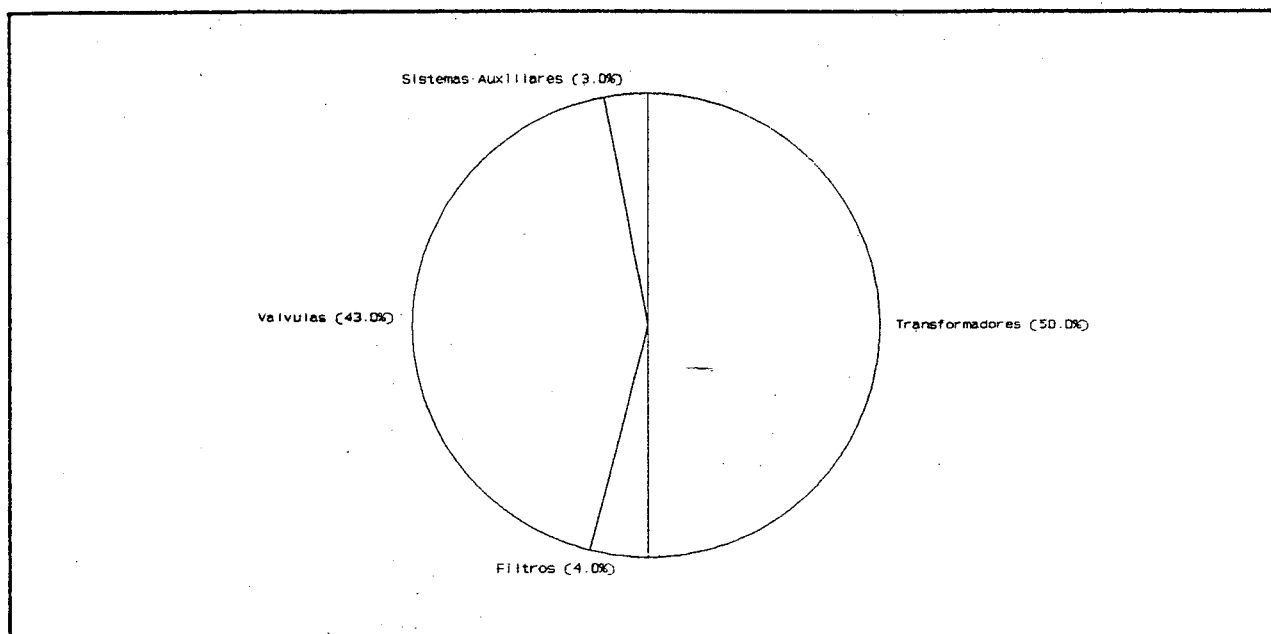


FIGURA 9 - Distribuição de Perdas em uma Estação Conversora.

2.7.- Drenagem de Pequenas Potências de um Sistema CCAT.

De acordo com o que já foi visto anteriormente, um sistema CCAT pode possuir vários terminais retificadores e inversores, constituindo-se assim um sistema multiterminal.

Os sistemas multiterminais concebidos até hoje só utilizam estações conversoras em paralelo, e a potência de cada um dos terminais não é inferior a 20% da potência nominal do sistema.

Uma das características de um sistema MTCC é a transmissão de grandes blocos de energia a grandes distâncias. Rotas longas geralmente acompanham rodovias em muitos trechos, passam por

pequenas cidades e vilas e outros tipos de cargas isoladas, cujo valor é extremamente inferior à potência nominal do sistema CCAT.

Este cenário sugere uma questão, cujas soluções, apesar de apontadas pela literatura especializada, nunca foram postas em prática. A questão aqui referida é justamente a viabilidade técnica e econômica da drenagem de pequenas potências de um sistema CCAT.

Alguns dos requisitos básicos de um suprimento como esse seriam:

- . Alimentar cargas cujo valor percentual é bem inferior à potência nominal do elo. É importante notar que isto não implica em valores absolutos pequenos. Uma carga isolada de 600 MW representa menos de 10% da potência transmitida em Itaipú, que é de 6300 MW.

- . Ser economicamente competitivo, quando comparado com outras alternativas. Geralmente, pequenas cargas isoladas são supridas por geração diesel local, ou por pequenos aproveitamentos hidrelétricos (PCH).

- . Causar um impacto desprezível na confiabilidade da transmissão principal que é um dos pontos fortes de uma transmissão CCAT. Portanto, é importante que o suprimento às pequenas cargas não penalizem o desempenho do elo. Este requisito relaciona-se diretamente com os que se seguem.

- . Os controles referentes ao pequeno suprimento em questão devem ser locais, de forma a não interferirem nos controles do elo principal e não encarecerem o sistema com a

necessidade de novos canais de telecomunicação.

. Quaisquer falhas ou funcionamentos indevidos dos equipamentos da instalação, devem implicar no "by-pass" rápido e confiável da mesma, evitando efeitos indesejáveis na transmissão principal.

A questão da drenagem de pequenas potências é o tema central do próximo capítulo. Nele serão descritos os meios possíveis de alimentação de pequenas cargas, suas vantagens e desvantagens.

2.8.- Conclusões.-

Neste capítulo foram apresentados aspectos gerais acerca dos sistemas de transmissão em corrente contínua, e feita uma análise comparativa em relação à transmissão CA, sob os pontos de vista técnico e econômico.

Foram também apresentadas as principais características dos sistemas multiterminais, incluindo os possíveis esquemas de conexão e aplicações.

Os diversos componentes de uma estação conversora foram destacados, em seguida, com o objetivo de melhor caracterizar a composição e a distribuição de custos das mesmas.

Finalmente é levantada a questão e os requisitos básicos da drenagem de pequenas potências ao longo das rotas de transmissão CC.

Uma abordagem mais profunda sobre a alimentação de pequenas cargas é feita no capítulo 3, dando destaque aos possíveis meios de se realizar este tipo de drenagem.

3.- Alimentação de Pequenas Cargas ao Longo de Rotas de Linhas de Transmissão CCAT.

3.1.- Introdução.

Já foi mostrado que a utilização de sistemas de transmissão em corrente contínua é bastante atrativa, principalmente na integração de grandes potenciais energéticos distantes dos centros consumidores. Entretanto, a maior parte dos sistemas CCAT em operação é do tipo ponto-a-ponto, interligando a geração e a carga.

Por outro lado, é bastante comum que as rotas das transmissões CCAT cruzem regiões em desenvolvimento, carentes de energia, caracterizadas por pequenas cargas cuja interligação com sistemas CA existentes é economicamente inviável, restando somente a alternativa de geração diesel local.

Os sistemas multiterminais de corrente contínua (MTCC) têm sido considerados nos estudos de planejamento das empresas concessionárias, já existindo um sistema deste tipo em operação, e outro em fase de construção. Porém, tais configurações só se justificam quando grandes potências devem ser supridas, devido principalmente ao elevado custo das estações conversoras de alta tensão convencionais.

Na busca de uma solução técnica e economicamente viável, para drenagem de pequenas potências das linhas CC foram identificados alguns requisitos básicos que devem ser observados, a saber:

. Alimentar cargas cujo valor percentual é bem inferior à potência nominal do elo, podendo atingir no máximo, cerca de 20% desta.

. Ser economicamente competitiva, quando comparada com outras alternativas. Geralmente, pequenas cargas isoladas são supridas por geração diesel local, ou por pequenos aproveitamentos hidrelétricos (PCH).

. Causar um impacto desprezível na confiabilidade da transmissão principal. Um dos pontos fortes de uma transmissão CCAT é o elevado índice de confiabilidade de atendimento à carga principal. Portanto, é importante que o suprimento às pequenas cargas intermediárias não penalizem o desempenho do elo. Este requisito relaciona-se diretamente com os que se seguem.

. Os controles referentes ao pequeno suprimento em questão devem ser locais, de forma a não interferirem nos controles do elo principal.

. Quaisquer falhas ou funcionamentos indevidos dos equipamentos da instalação em pauta devem ser isolados rápida e confiavelmente, evitando efeitos indesejados na transmissão principal.

3.2.- Estações Conversoras Série e Paralelo.

Existem basicamente duas configurações de estações conversoras

CA/CC que podem, a princípio, ser aplicadas na drenagem de pequenas potências. A primeira configuração é uma derivação em paralelo, na qual a conversora é instalada entre o polo e a terra, à semelhança das conversoras principais, sendo por este motivo denominada de estação conversora em paralelo (ECP). Este é o tipo de configuração que tem sido utilizado em sistemas multiterminais. Com relação à aplicação da ECP, na alimentação de pequenas cargas, destacam-se as seguintes características:

- . O nível de isolamento da derivação deve ser compatível com a tensão nominal do sistema. Esta característica limita a potência mínima da derivação, por razões econômicas. A prática mostra, por exemplo, que se o custo de uma ECP de alta tensão for de 1 PU, uma outra com os mesmos níveis de isolamento, mas dimensionada para a metade da potência da primeira, custará 0.75 PU.

- . As falhas de comutação na ECP, ou faltas entre o polo da estação e a terra, são curtos-circuitos de baixa impedância entre a linha CC e a terra. Com isso sobrecorrentes elevadas são produzidas nas estações principais.

- . Faltas na rede CA alimentada pela ECP, que venham causar falhas de comutação, afetam a rede CCAT como um todo, pelas razões expostas anteriormente.

- . Qualquer um dos defeitos na ECP, relatados acima, ocasionam uma interrupção na transmissão principal, por ação dos controles, com o intuito de desenergizar o sistema e possibilitar a eliminação do referido defeito. Esta

interrupção só seria evitada com o desenvolvimento de disjuntores CC eficientes, para serem instalados em série com a ECP.

A outra configuração alternativa é a estação conversora série (ECS) que, como o nome sugere, é instalada em série com a transmissão principal. Suas características mais relevantes ao atendimento de pequenas cargas são:

. A ECS representa um queda de tensão na transmissão principal, devendo, por este motivo, ser associada somente a baixas potências drenadas, que sejam da mesma ordem de grandeza das perdas do elo CC.

. Os equipamentos da conversora devem ser dimensionados para a corrente nominal da transmissão. A tensão nominal de operação dos mesmos dependerá da potência a ser drenada, não ultrapassando 20% da tensão de operação do elo, conforme já discutido. Entretanto, estes equipamentos devem ser posicionados em uma plataforma isolada para a tensão nominal do elo. Somente os transformadores conversores deverão possuir um isolamento, entre seus enrolamentos, compatível com a tensão do sistema principal, por não serem estes acomodados na plataforma.

. Defeitos na ECS, tais como falha de comutação ou falhas de isolamento que provoquem curto-circuito na conversora, não são sentidos pela transmissão principal. As únicas falhas que afetam o elo são as ocorridas no isolamento da plataforma, com baixa probabilidade de ocorrência.

. A utilização de um dispositivo simples de "by-pass" rápido evita que qualquer mau funcionamento da ECS influencie na transmissão principal.

. Os controles de uma ECS podem ser autônomos e independentes dos controles principais do elo, não sendo necessária qualquer forma de comunicação com as conversoras principais.

A análise comparativa das características enumeradas mostra ser a ECP a mais conveniente em aplicações que envolvam grandes potências percentuais, como é o caso dos sistemas multiterminais. Drenagens de pequenas potências são nitidamente efetuadas com maior confiabilidade e menor custo através da ECS, justificando-se assim a escolha desta configuração para realização deste trabalho.

A seguir será feita uma abordagem mais detalhada de uma ECS, incluindo possíveis esquemas e equipamentos componentes.

3.3.- A Estação Conversora Série.

O esquema geral básico proposto para uma estação conversora série é mostrado nas figuras 10 e 11. Cabe ressaltar que, embora a ECS possua as características mais adequadas para a alimentação de pequenas cargas, conforme visto anteriormente, não existem ainda instalações deste tipo em operação.

Os equipamentos eletrônicos, incluindo as válvulas conversoras

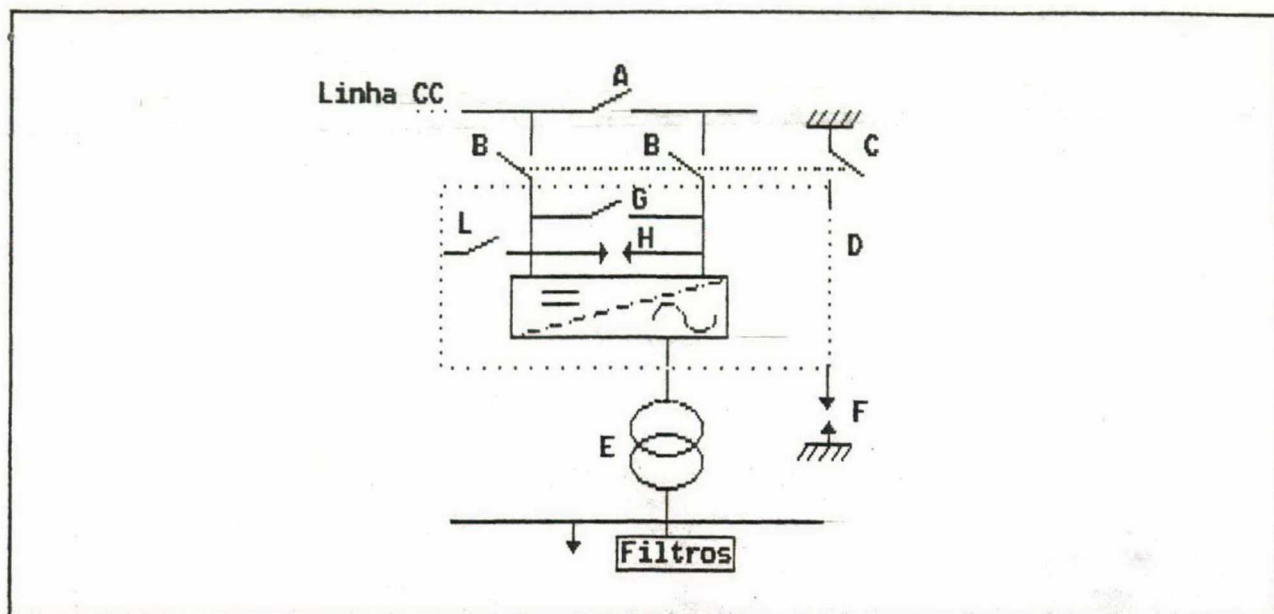


FIGURA 10 - Diagrama Unifilar da Estação Conversora Série.

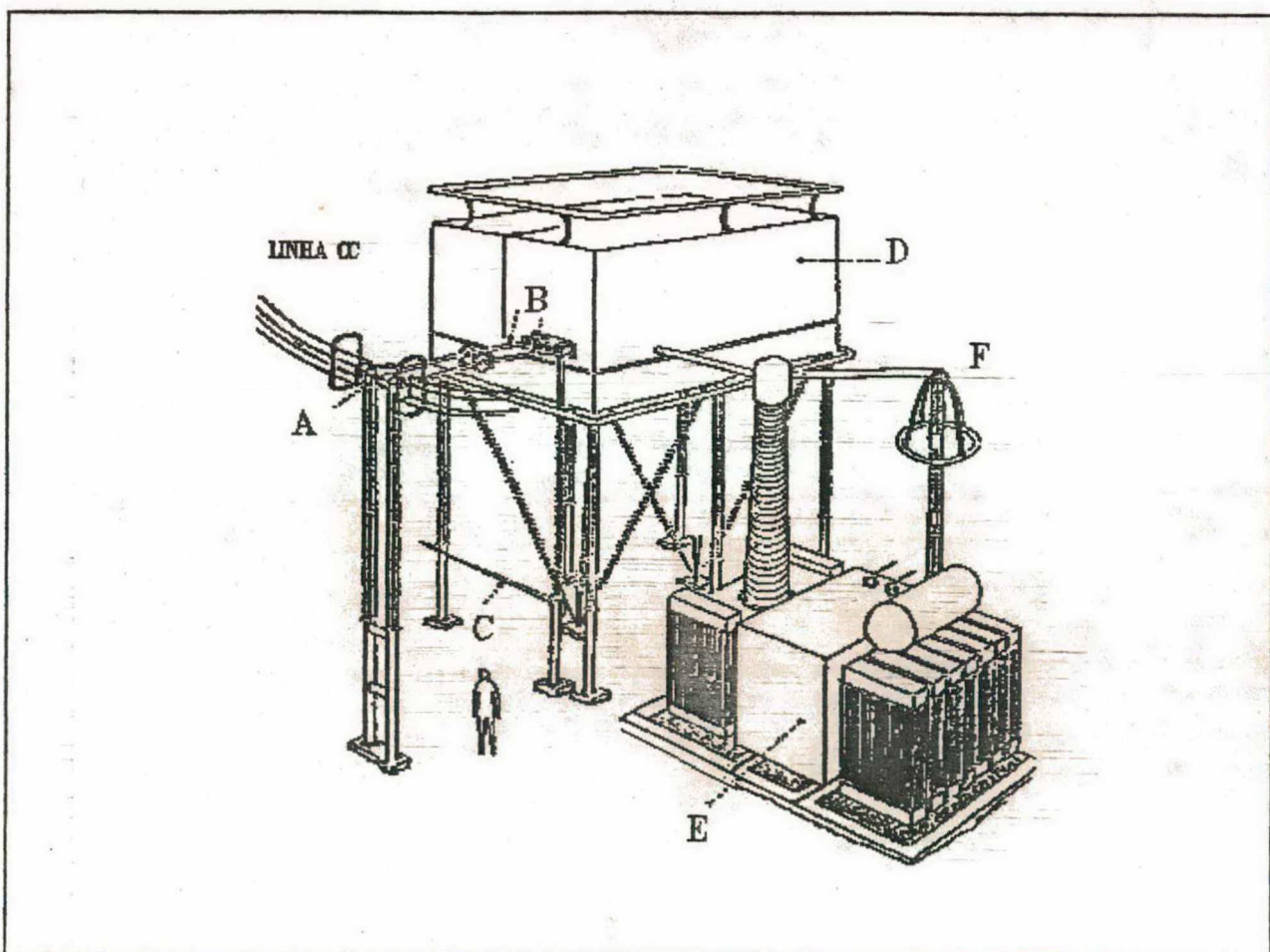


FIGURA 11 - Estação Conversora Série.

CA/CC com seus equipamentos auxiliares e os filtros CC, são instalados em caixas metálicas, sobre a plataforma isolada para o nível de tensão da linha de transmissão. Os demais equipamentos

principais presentes são o transformador conversor e os filtros CA. É importante lembrar que o isolamento entre os enrolamentos do transformador deve ser compatível com a tensão nominal da transmissão principal.

A estação é inserida em série com o polo CC, através de conectores, como mostram as figuras, ou seja, fechando-se as chaves "B", e abrindo-se as chaves "A". A chave "G" permite o "by-pass" rápido da ECS em caso de falhas, evitando-se interrupções na transmissão principal. Esta chave pode ser um disjuntor operado por motor, ou mesmo uma válvula de tiristores.

Os pára-raios "F" e "H", de ZnO, protegem os equipamentos contra sobretensões. Já as chaves "L" e "C" permitem o aterramento da estação, quando a mesma está fora de operação.

A princípio qualquer conversor CC/CA e vice-versa pode ser de dois tipos, dependendo da maneira como é processada a comutação da corrente CC no interior do mesmo. Neste sentido existem conversores de comutação natural e de comutação forçada.

Diversos esquemas de implementação de uma ECS, envolvendo conversores de comutação natural e forçada, têm sido propostos na bibliografia especializada, mantendo-se, contudo, a disposição básica apresentada. As únicas diferenças entre estes esquemas localizam-se nos dispositivos de conversão CC/CA, e na eventual necessidade de outros equipamentos tais como compensadores síncronos. Estes diversos esquemas serão apresentados ainda neste capítulo. Antes, porém, é importante destacar algumas características importantes dos conversores de comutação forçada

e natural, o que é feito, sucintamente, a seguir.

Os conversores utilizados nos sistemas de transmissão CCAT são compostas por válvulas tiristorizadas, conforme visto no capítulo 1. A comutação da corrente CC entre as válvulas é comandada pelos pulsos de disparo enviados às mesmas. Para que a comutação se concretize é necessário que a tensão CA entre fases polarize positivamente a válvula a ser disparada, ou seja, a válvula que iniciará a condução. A este tipo de conversores é dado o nome de conversores de comutação natural. Seus princípio de funcionamento e equacionamento básico podem ser encontrados nas referências [1] e [2], e no apêndice D deste trabalho. Uma apresentação sumária das equações é também apresentada no apêndice A.

Entretanto a comutação entre as válvulas pode ser feita artificialmente, através de circuitos externos denominados de circuitos de comutação forçada. Este tipo de conversor é conhecido como de comutação forçada, podendo ser implementado com válvulas que possuem capacidade de interromper sua própria corrente. Para tal são utilizados os tiristores GTO (abreviatura do inglês "gate turn-off thyristor"). Uma outra forma de realizar a comutação forçada é através da energia armazenada em capacitores.

Atualmente, a comutação forçada é utilizada somente em aplicações de média e baixa tensão tais como processos industriais e tração urbana. Entretanto, há uma grande perspectiva de utilização futura de conversores de comutação forçada nas transmissões CCAT, principalmente com o desenvolvimento esperado para o GTO, o que conduzirá a maiores valores nominais de corrente e tensão, e a uma melhor capacidade de interrupção de corrente, com perdas menores

e correntes de gatilho mais reduzidas.

As vantagens esperadas, com a utilização de conversores de comutação forçada, em substituição aos conversores de comutação natural, nos sistemas de transmissão CCAT, são:

- . Possibilidade de gerar potência reativa para a rede CA conectada, o que, por sua vez, reduz a necessidade de instalação de capacitores ao valor mínimo requerido para filtragem de harmônicos. Desta forma são reduzidos também os riscos de sobretensões temporárias e ressonâncias ocasionadas pelo elevado grau de compensação reativa (capacitores) normalmente instalado em estações conversoras de comutação natural.

- . Minimização dos riscos de falha de comutação nos inversores ligados a sistemas CA fracos, eliminado-se a necessidade de instalação de compensadores síncronos para elevar o nível de curto-circuito da referida rede CA. Na realidade, o dito nível de curto-circuito poderá ser mesmo nulo, ou seja, uma rede composta apenas de elementos passivos.

- . Com o desenvolvimento do GTO será possível controlar o fluxo de potência ativa, entre as redes CA e CC, independentemente da potência reativa gerada ou consumida pelos conversores. Com isto, uma estação conversora poderá também exercer as funções de um compensador estático, com inúmeros benefícios para a operação do sistema como um todo, tanto em regime permanente como em condições transitórias.

Embora cogitados para serem utilizados na drenagem de pequenas potências, os conversores de comutação forçada com capacitores apresentam algumas desvantagens, das quais se podem destacar:

- . Os capacitores de comutação introduzem maiores distorções na tensão CC. Além disto, a geração de potência reativa pelo conversor obrigaria a utilização de capacitores muito grandes, maiores até que os requeridos para a compensação de reativos de uma estação de comutação natural.

- . As válvulas tiristorizadas são normalmente mais estressadas que as utilizadas nos conversores de comutação natural e devem possuir uma rápida capacidade de recuperação. Isto resulta em tiristores mais rápidos, e portanto mais caros, além de maiores perdas nas válvulas.

- . O controle independente de potências ativa e reativa, que se espera alcançar com o uso do GTO, não é possível para este tipo de conversores.

Cabe destacar que as desvantagens apontadas não inviabilizam a utilização de conversores de comutação forçada com capacitores nas aplicações de pequena potência, sobretudo do ponto de vista econômico, uma vez que a necessidade de compensadores síncronos é eliminada.

Entretanto, somente o desenvolvimento de componentes como o GTO permitirá que as conversoras de comutação forçada apresentem desempenho técnico superior às de comutação natural. As referências

[3] e [4], sugerem alguns arranjos de ECS de comutação forçada com capacitores, para o suprimento de pequenas cargas.

A seguir será detalhado o esquema de ECS de comutação natural utilizada no presente trabalho.

3.4.- ECS de Comutação Natural..

A ECS de comutação natural baseia-se totalmente na tecnologia utilizada em conversoras CCAT convencionais. Um diagrama simplificado é apresentado na figura 12.

A potência é extraída da transmissão principal por meio de uma ou duas pontes de seis pulsos convencionais. As pontes são então conectadas aos transformadores conversores, cujos enrolamentos, do lado das válvulas, são ligados em estrela e triângulo, respectivamente.

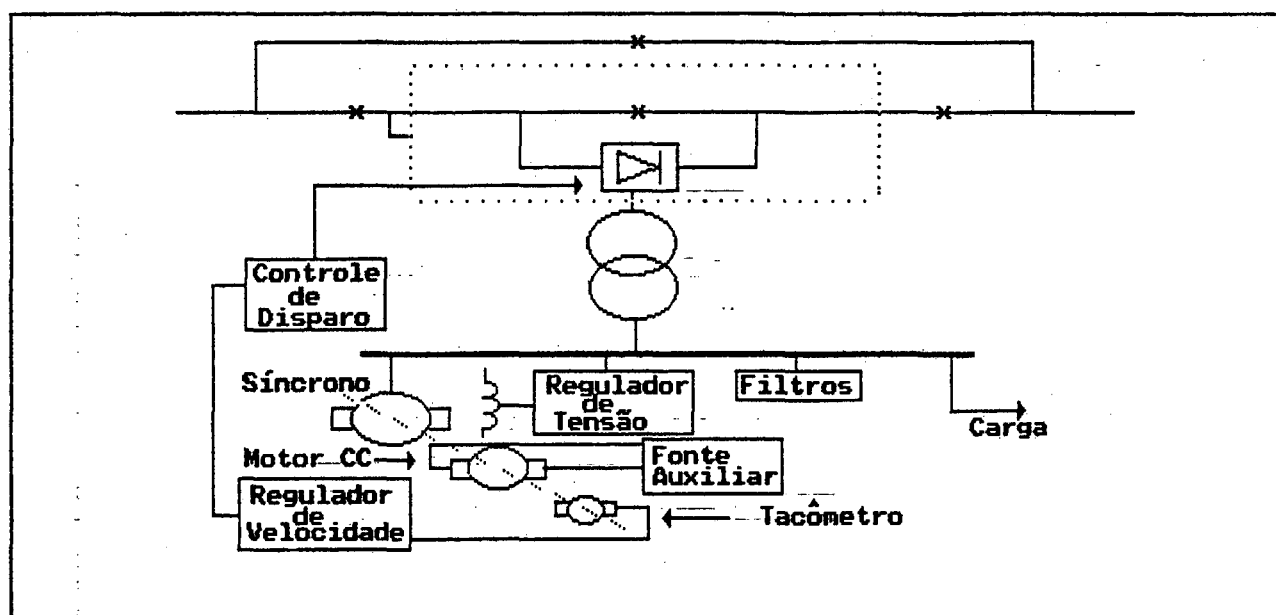


FIGURA 12 - Estação Conversora Série de Comutação Natural.

A parte CA da estação, além dos filtros, deve possuir também uma máquina síncrona (compensador síncrono) provendo a tensão CA necessária à comutação natural e fornecendo parte da potência reativa consumida pelos conversores. O sistema de excitação da referida máquina pode efetivamente controlar a tensão do barramento CA da estação.

O ângulo de disparo das válvulas deve ser controlado de forma que a potência ativa exigida pela carga seja fornecida pela estação. A frequência da máquina síncrona também é controlada através de modulações da potência ativa drenada.

No processo de partida da ECS uma fonte auxiliar de potência ativa é necessária para acelerar a máquina CA até uma frequência mínima que garanta o sucesso das comutações iniciais.

O dimensionamento de uma ECS de comutação natural deve basear-se no comportamento da carga a ser suprida e da corrente CC controlada pelas estações principais. Um conhecimento detalhado destas grandezas é necessário para a determinação da faixa de variação do ângulo de disparo das válvulas, do número de derivações dos comutadores sob carga dos transformadores e da potência reativa requerida.

O comportamento de uma ECS de comutação natural, quando da ocorrência de faltas na rede CA suprida pela mesma, não prejudica a transmissão principal, visto que as falhas de comutação consequentes significam um curto-circuito na estação, pelo lado CC.

Entretanto, o colapso na tensão CA proveniente da falta em questão pode impedir o sucesso das comutações nas válvulas da ECS, causando então a interrupção do suprimento local.

A grande desvantagem das ECS de comutação natural, com relação às de comutação forçada com capacitores, é sem dúvida a necessidade do compensador síncrono, caso o sistema CA a ser suprido seja um sistema fraco (baixa potência de curto-circuito), ou mesmo uma carga totalmente passiva.

Contudo, os custos das válvulas utilizadas nas ECS de comutação forçada elevam-se sensivelmente, a medida em que a potência a ser suprida aumenta. Isto se deve ao elevado número de componentes tais como válvulas de tiristores associados a diodos e capacitores de comutação, que reduzem também os índices de confiabilidade da instalação.

Desta forma, a diferença de custos entre as conversoras dos dois tipos passa a ser de menor relevância, na medida em que o valor da potência aumenta.

Estas considerações, aliadas ao domínio total da tecnologia de comutação natural usada nas conversoras CCAT convencionais, fazem deste tipo de conversoras as mais convenientes para potências maiores que 10 ou 15 MW.

O presente trabalho prossegue com o dimensionamento de uma ECS para suprimento de uma carga, a partir de um sistema de transmissão ponto-a-ponto bipolar de ± 350 kV e potência nominal transmitida de 1000 MW. A carga em questão é de 25 MW e será suprida por uma ECS

de comutação natural.

3.5.- Conclusões

Da abordagem feita neste capítulo, sobre alimentação de pequenas cargas ao longo de linhas de transmissão CCAT, destacam-se os seguintes pontos:

a) A alimentação de pequenas cargas ao longo das rotas de transmissão CCAT, cujas ordens de grandeza sejam em torno das perdas do elo principal, pode ser realizada através de estações conversoras série (ECS). Esta solução se apresenta bastante atrativa, tanto técnica como economicamente, devendo, entretanto, ser comparada com outras alternativas, tais como geração local, na busca da solução mais conveniente.

b) As estações conversoras em paralelo (ECP) só se justificam em aplicações que envolvam grandes potências, como é o caso dos sistemas multiterminais de corrente contínua (MTCC). Isto se deve principalmente ao alto custo do isolamento destas conversoras, para sistemas de alta tensão, tornando-as economicamente inviáveis para pequenas potências.

c) Dependendo do tipo de conversor, as ECS podem ser de comutação forçada ou natural. Ambas são, a princípio,

alternativas viáveis para o suprimento de pequenas cargas.

d) A comutação forçada pode utilizar o conhecido GTO ou os capacitores de comutação. Este primeiro dispositivo carece de maiores desenvolvimentos, relacionados à capacidade de interrupção de correntes, para ser efetivamente aplicado em instalações CCAT. Com isto os capacitores de comutação constituem-se na única alternativa atualmente viável para a comutação forçada.

e) A necessidade de instalação de compensadores síncronos faz da comutação natural uma alternativa de maior custo. Contudo, a diferença de preços entre as ECS de comutação forçada e natural torna-se menor quando a potência a ser drenada aumenta.

f) O maior número de componentes exigido na comutação forçada com capacitores torna esta alternativa mais sujeita a falhas, quando comparada à comutação natural.

g) A escolha da configuração final da ECS dependerá de uma análise de desempenho e custos que deve ser feita considerando também outras alternativas tais como geração local. Ressalta-se que a alimentação de pequenas cargas ao longo de rotas CCAT, nunca foram implementadas, independentemente da configuração escolhida para a ECS.

No capítulo seguinte será apresentada uma metodologia para o dimensionamento de uma ECS de comutação natural. A opção por esta configuração deveu-se à sua adequação ao caso específico em estudo na ELETRONORTE, onde a potência a ser drenada é da ordem de 25 MW. Acrescenta-se a este fato a conveniência da utilização de uma tecnologia exaustivamente aplicada em estações conversoras CCAT convencionais.

4.- Metodologia para o Dimensionamento Básico de uma Estação Conversora Série de Comutação Natural.

4.1.- Introdução.

Neste capítulo será desenvolvida uma metodologia que permite o dimensionamento básico dos principais itens componentes de uma estação conversora série, a saber:

- . Características principais das válvulas, desde a determinação do ponto nominal de operação, escolha do número de pontes conversoras, determinação da faixa de variação admissível do ângulo de extinção.

- . Características principais dos transformadores conversores, com a obtenção dos valores nominais de potência, reatância e faixa de variação dos comutadores sob carga (LTC).

- . Dimensionamento da compensação reativa a partir da determinação do consumo de reativo da ECS.

A metodologia aqui desenvolvida baseia-se na construção das chamadas "Regiões Operativas" que descrevem o comportamento da ECS em regime permanente, considerando também limitações práticas e construtivas inerentes aos equipamentos componentes.

O conhecimento das equações da conversora CA/CC, em regime permanente, é fundamental para o entendimento do conteúdo deste

capítulo. Tais equações, bem como a dedução das mesmas, podem ser encontradas na bibliografia básica sobre transmissão em corrente contínua, com destaque para as referências [1] e [2], e no apêndice D deste trabalho, cuja leitura prévia é recomendável. Uma apresentação sumária das equações da conversora CA/CC, na forma em que serão aqui utilizadas, é encontrada no apêndice A.

4.2.- A Região Operativa.

Deu-se o nome de região operativa (RO) a uma região bem definida do plano $V_a \times I_a$, onde V_a é a tensão contínua terminal da ECS e I_a a corrente contínua que flui no circuito principal, correspondente aos possíveis pontos de operação em regime permanente da ECS. A questão básica é conhecer quais fatores influenciam esta região para, a partir daí, definir a mesma.

Inicialmente é importante ter em mente a característica fundamental de funcionamento de uma ECS. A corrente I_a que flui pela linha é controlada exclusivamente pelas estações principais. Com base nesta corrente, e na potência P_a que a ECS deve suprir, os controles ajustam a tensão terminal V_a de cada ponto de operação. Além disto, alguns aspectos teóricos e práticos devem ser considerados, conforme será descrito a seguir.

4.2.1.- Aspectos que Influenciam a Região Operativa.

a) Corrente no Elo Principal: conforme já foi mencionado anteriormente, a corrente CC é controlada exclusivamente pelas

estações principais, ou seja, depende da carga que o inversor principal deve suprir.

Os sistemas CCAT existentes admitem correntes bastante reduzidas, que podem atingir 10% da corrente nominal de operação. Por outro lado, é bastante comum serem permitidas sobrecorrentes em regime permanente, que podem variar de 10% a 40% ou mais, em condições de emergência como, por exemplo, a saída de um dos polos de uma transmissão bipolar.

b) **Carga Alimentada pela ECS:** o comportamento da carga a ser alimentada pela ECS é também um fator determinante na obtenção da região operativa. As curvas diárias da carga, bem como as projeções futuras, precisam ser bem conhecidas, além de confrontadas com as variações da carga do inversor principal do elo.

É possível que a condição de carga leve da ECS não corresponda à mesma condição da carga do inversor principal, o mesmo podendo ocorrer em carga pesada. Como consequência podem ser previstas situações extremas caracterizadas pela drenagem de uma pequena potência na ECS quando a corrente no elo é elevada, ou a situação em que a carga da ECS é máxima enquanto a corrente no elo é mínima.

c) **Faixa de Variação dos Comutadores sob Carga (LTC):** Os comutadores dos transformadores conversores são normalmente localizados nos enrolamentos primários, ligados ao barramento CA da estação. A função dos comutadores é controlar a tensão dos enrolamentos secundários, conectados às válvulas, através da variação da relação de transformação.

Existem limitações práticas e construtivas dos comutadores, relacionadas ao número de derivações que se pode dispor, e à variação percentual da relação de transformação entre as derivações.

De uma forma geral, os transformadores conversores de estações de grande porte operam com tensões elevadas. Nestes casos, o número máximo de derivações gira em torno de 30, com variações de 1,25 % a 2%.

Contudo, uma faixa de variação mais abrangente da relação de transformação pode ser requerida pela ECS, em decorrência das variações da corrente no elo principal e das flutuações da carga a ser por ela suprida. É importante lembrar que o LTC é um dos meios de ajustar a tensão terminal da ECS, de forma a alcançar a potência requisitada pela estação, para um dado valor de corrente no elo.

O suprimento de pequenas cargas via ECS está ligado a tensões de trabalho reduzidas e, conseqüentemente, a transformadores de menor porte. Em tais situações, não só o número de derivações como também as variações percentuais da relação de transformação podem ser maiores, atingindo uma faixa entre 40 e 50 derivações de 2%, ou até mais.

d) **Reatância do Transformador:** a reatância efetiva de um transformador que disponha de LTC é alterada de diversas formas, devido a fatores tais como corrente, número de espiras, tensão

aplicada por espira e comprimento do enrolamento onde está localizado o comutador.

A referência [6], mostra que todos estes fatores combinados causam uma variação na reatância, teoricamente proporcional ao quadrado da largura percentual de cada passo do LTC, quantidade esta definida por T_h no apêndice A.

Entretanto, distorções no fluxo de dispersão, causadas por modificações no comprimento do enrolamento do LTC, não permitem que a reatância varie tão abruptamente.

Como resultado, a melhor representação da variação da reatância com a posição do tape, que combina todos os fatores expostos, é uma função linear de T_h .

Para fins de cálculos, em condições de regime permanente, o valor da reatância dos transformadores conversores é normalmente considerado constante, posto que as variações devidas à posição do tape são pequenas.

No caso das ECS, entretanto, o valor da reatância dos transformadores pode tornar-se bastante diferente do valor nominal, face à grande faixa requerida para os comutadores.

No equacionamento desenvolvido no apêndice A, a impedância do transformador é apresentada em uma forma mais conveniente, como sendo a grandeza d_x . Assim sendo, deve ser processada uma correção linear no valor nominal d_m , de acordo com a posição do tape, de forma que os resultados representem melhor os fenômenos físicos envolvidos.

e) Ângulo de Extinção " γ ": teoricamente o ângulo de extinção de uma conversora de comutação natural pode variar entre 0° e 90° . Entretanto existem certos limites práticos que devem ser respeitados.

O batente inferior do ângulo de extinção deve ser suficiente para garantir o sucesso da comutação da corrente CC entre as válvulas. Em instalações convencionais de grande porte, o ângulo mínimo de extinção é fixado entre 10° e 25° , o que deve ser também considerado para as ECS.

O suprimento de pequenas cargas, no caso das ECS, exigirá ângulos de extinção elevados, principalmente quando a corrente CC do elo for também elevada. Pode-se afirmar que a operação com grandes ângulos de extinção será necessária para a maioria das ECS.

Levando em conta que o consumo de potência reativa da estação aumenta com o aumento do ângulo de extinção, a operação com ângulos de extinção elevados acarreta na maior necessidade de compensação reativa para a estação. Como será visto mais tarde, este fator não tem a mesma relevância no projeto de uma ECS, do que teria em uma estação conversora de grande porte.

Além do acréscimo no consumo de reativo, ângulos de extinção elevados implicam em maiores solicitações nas válvulas tiristorizadas e, conseqüentemente, maiores perdas, o que precisa ser considerado no projeto das mesmas. As referências [1] e [2] abordam, com mais profundidade, assuntos relativos a projetos de válvulas, circuitos equalizadores e perdas.

A operação da ECS, a operação com ângulos de extinção entre 40° e 50° , não implica em grandes alterações de projeto, ou sobrecustos nas válvulas. Durante emergências de pequena duração, tais como rejeições de carga na ECS, pode-se admitir ângulos de extinção ainda maiores, em torno de 60° ou 70° .

f) **Ângulo de Comutação " μ "**: a formulação apresentada no apêndice A pressupõe ângulos de comutação inferiores a 60° , para pontes de seis pulsos, e 30° para pontes de doze pulsos.

Várias grandezas influem no valor do ângulo de comutação, tais como a reatância do transformador conversor e a corrente CC do elo. É de extrema importância, portanto, que, durante os cálculos para obtenção da região operativa, esta grandeza seja constantemente monitorada, para garantir a validade dos resultados.

g) **Tensão na Barra CA da Estação**: é controlada pelo compensador síncrono, dentro de limites previamente estabelecidos. Tais limites devem ser considerados na construção da RO, assegurando assim a correta avaliação da faixa dos LTC e do consumo de potência reativa pela ECS.

4.3.- Dados e Premissas para Obtenção da RO.

A construção da RO deve ser precedida pela definição de dados e premissas como se segue.

- **Definição da configuração básica a ser estudada:** a ECS pode ser formada por uma ou duas pontes de seis pulsos. A configuração com duas pontes traz uma maior flexibilidade operativa, uma vez que uma das pontes pode ser desligada durante os períodos de carga leve. Contudo, é suficiente determinar a RO para somente uma ponte de seis pulsos, mesmo que a configuração pretendida seja com duas pontes.

- **Estabelecimento dos dados básicos e os valores nominais:** pelo lado CC deve-se definir os valores nominais de corrente, potência e tensão, para cada ponte de seis pulsos, além da reatância de comutação.

O valor nominal da corrente e a faixa de variação admissível para mesma, são ditadas pelo circuito principal. A potência nominal da ECS é escolhida de acordo com as peculiaridades de cada projeto. Uma boa prática é arbitrar a carga máxima que cada ponte de seis pulsos deve suprir, como sendo a potência nominal por ponte. De posse dos valores nominais de corrente e potência chega-se à tensão CC nominal por ponte.

Para a reatância de comutação, traduzida no apêndice A pela grandeza d_x , pode ser arbitrado um valor nominal típico, em torno de 6%, o que corresponde a uma reatância de transformador em torno de 12%.

Pelo lado CA, a tensão nominal completa os dados básicos — requeridos para a obtenção da RO.

- **Estimativa das faixas para o LTC e r :** tais faixas devem

obedecer os limites práticos já discutidos.

- Definição de todas as combinações carga da ECS x corrente do elo: o conjunto de combinações possíveis, entre os valores de carga da ECS e da corrente do elo, definem os pontos de operação que a RO deve acomodar.

4.4.- Construção da Região Operativa.

Após o estabelecimento dos valores nominais e demais dados básicos, passa-se à construção da RO propriamente dita.

Na medida em que deve acomodar todas as possíveis combinações carga da ECS x corrente do elo, além de obedecer as limitações práticas dos equipamentos, é muitas vezes necessário reajustar os valores nominais e as grandezas estimadas descritas no item anterior, até que se alcance uma RO adequada.

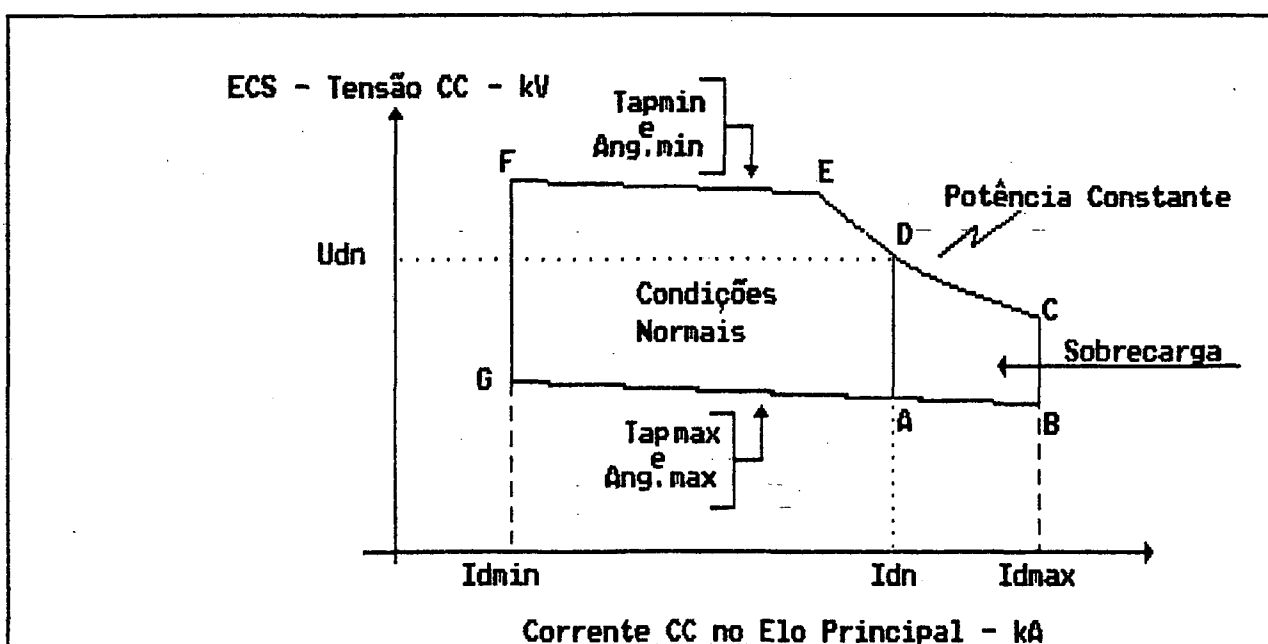


FIGURA 13 - Região Operativa Típica.

A figura 13 apresenta uma região operativa típica, na qual se baseará a abordagem que se segue. É importante ressaltar que a região operativa pode assumir diferentes formas que dependerão das condições de contorno inerentes a cada projeto.

Será feita agora uma análise de cada uma das curvas que compõe a RO da figura 13. Conforme pode ser observado, esta se divide em duas subregiões. A primeira definida pela curva "A-D-E-F-G-A" refere-se a condições normais de operação, com a corrente CC variando entre seus valores mínimo e o nominal.

A outra subregião, limitada pela curva "A-B-C-D", representa as sobrecargas admissíveis, com as correntes limitadas pelo valor máximo permitido.

Toda a formulação a ser apresentada foi compilada em um programa Fortran, para a construção sistemática da RO. A listagem fonte e a forma de utilização deste programa pode ser encontrada no apêndice B.

4.4.1.- Curva "C-D-E".

a) Características: esta é uma curva em que a potência é mantida constante e no valor nominal para o qual a ECS será dimensionada. É uma boa prática arbitrar a carga máxima prevista, como sendo a potência nominal da ECS.

O ponto "D" corresponde ao ponto nominal de operação, com a corrente CC em seu valor nominal. Para este ponto adota-se ângulo

de extinção mínimo, como ocorre nas estações CCAT convencionais, limitando-se o consumo de potência reativa. A posição do LTC é central. Assim sendo, as características do ponto "D" são:

$$I_d = I_{dn} \quad (5)$$

$$P_d = P_{dn} = P_{dn\max} \quad (6)$$

$$\tau = \tau_n = \tau_{\min} \quad (7)$$

$$d_x = d_{xn} \quad (8)$$

$$\text{Tap} = \text{Tap}_{\text{nom}} = 0 \text{ (posição central)} \quad (9)$$

$$U_{dio} = U_{dion} = \frac{U_d}{\cos \tau - d_{xn}} \quad (10)$$

Para que a potência seja mantida constante, a medida em que a corrente se reduz, a partir de seu valor nominal, é preciso que a tensão terminal da ECS seja aumentada. Existem dois meios para aumentar esta tensão.

O primeiro deles é a redução do ângulo de extinção, que por já se encontrar em seu valor mínimo, não pode assumir valores menores. Resta então a segunda forma de elevação da tensão terminal, através da redução da posição do LTC.

Atinge-se então o ponto "E", caracterizado por potência nominal e ângulo de extinção e posição do LTC nos mínimos valores possíveis.

Tem-se então para "E":

$$\tau = \tau_n = \tau_{\min} \quad (11)$$

$$P_d = P_{dn} = P_{d\max} \quad (12)$$

$$\text{Tap} = \text{Tap}_{\min} \quad (13)$$

Caminhando no outro sentido, ou seja, aumentando-se a corrente, há uma necessidade de reduzir a tensão terminal da ECS para, assim, manter constante a potência fornecida. O ponto "C", corresponde à máxima sobrecorrente admissível. Isto pode ser feito tanto aumentando o ângulo de extinção como a posição do LTC.

Entretanto, na estratégia adotada aumentou-se inicialmente a posição do LTC, visando manter o ângulo de extinção no menor valor possível. Minimizou-se, desta forma, o consumo de reativo da estação, para cada um dos pontos que compõe a curva. Esta estratégia foi a mesma utilizada na obtenção de outras curvas, toda vez que foi necessária uma redução da tensão.

As características do ponto "C" são :

$$I_d = I_{d\max} \quad (14)$$

$$P_d = P_{dn} = P_{d\max} \quad (15)$$

É também no ponto "C" que a potência aparente normalmente assume o seu valor máximo, o qual deve ser usado no dimensionamento dos

transformadores conversores.

Resumindo, a curva de potência constante "C-D-E" inicia-se no ponto correspondente à maior corrente de sobrecarga (C), chegando ao ponto em que os valores mínimos do LTC e ângulo de extinção são alcançados (E), passando pelo ponto nominal de operação (D).

b) Obtenção da Curva e das Grandezas Auxiliares: fazendo-se a corrente variar no intervalo limitado pelas abscissas dos pontos "C" e "E" obtém-se a curva em questão, com o uso da seguinte equação:

$$U_d = P_{dmax} / I_d \quad (16)$$

Além da corrente, tensão e potência CC, outras grandezas precisam ser determinadas para cada um dos pontos da curva, por serem imprescindíveis à análise da RO e ao dimensionamento da ECS.

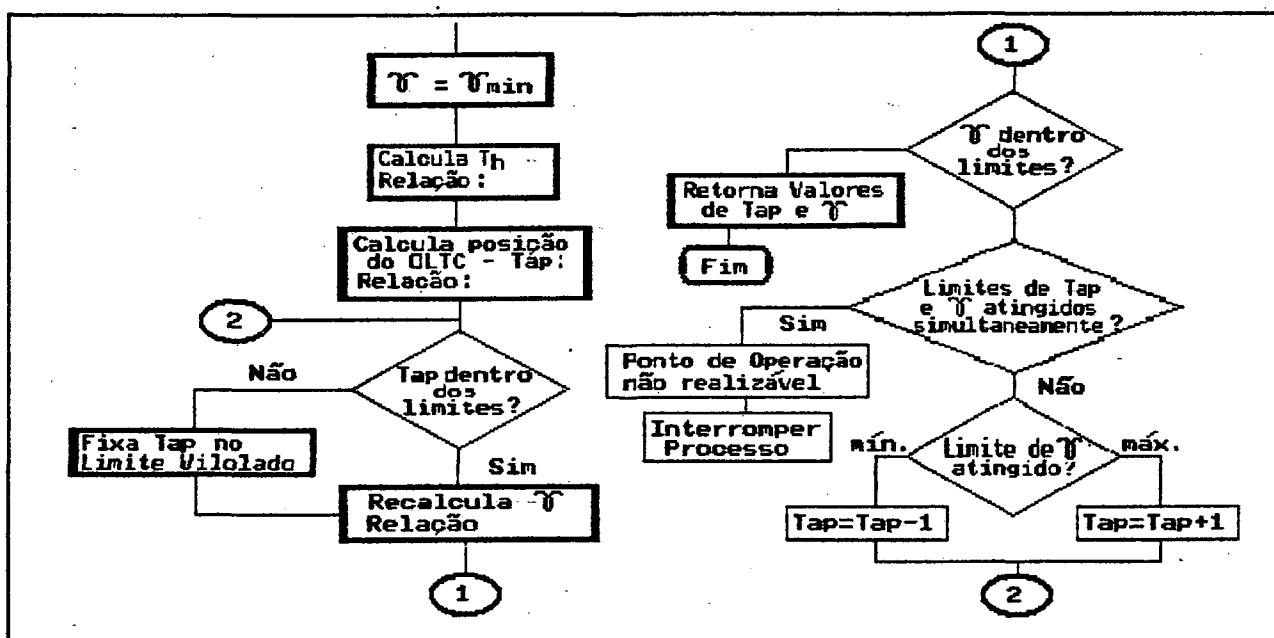


FIGURA 14 - Fluxograma para Cálculo de Tapa e τ .

Inicialmente são obtidos a posição do LTC, e o ângulo de extinção, através de um processo iterativo, ilustrado no fluxograma da figura 14, cuja meta é descobrir o menor ângulo de disparo possível, para cada ponto, e a posição do LTC que se ajusta a este valor.

Foi discutido anteriormente que a impedância do transformador varia linearmente com a posição do LTC, o que pode ser traduzido pela seguinte equação:

$$d_x = T_h \cdot d_{xm} \quad (17)$$

A combinação desta equação com as equações de (a.2), (a.3) e (a.5) do apêndice A, conduz à relação (18), abaixo, que tem como incógnitas T_h e τ .

$$A \cdot T_h^2 + B \cdot T_h + C \cdot \cos \tau = 0, \quad (18)$$

onde identificam-se os termos:

$$A = d_{xm} \cdot \frac{I_d}{I_{dn}} \cdot U_{dion}$$

$$B = U_d$$

$$C = -\frac{3/2}{\pi} \cdot \cos \tau \cdot U_{vm} \cdot \frac{U_b}{U_{bn}}$$

Com o menor valor possível para o ângulo de extinção, o que resulta no menor consumo de reativo da ECS, soluciona-se a equação (18), para a variável T_h . Como esta é uma equação do segundo grau, a raiz

procurada deve ser positiva.

Em seguida obtém-se a posição correspondente do tape, com o uso da equação (a.6) do apêndice A.

Este último valor deve então ser comparado com os limites máximo e mínimo estabelecidos. Caso algum destes limites seja violado, a posição do LTC deve ser congelado no limite atingido.

Agora é necessário recalcular o ângulo de extinção, uma vez que o valor do tape inicialmente obtido foi alterado, seja porque algum limite foi violado ou simplesmente devido ao arredondamento realizado com a equação (a.6). Para tal a mesma equação (18) pode ser utilizada, chegando-se ao novo valor de r condizente com o tape ajustado.

O próximo passo é verificar se o novo valor de r recentemente calculado não fere seus limites, previamente estabelecidos. Se isto ocorrer resta ainda a possibilidade de tentar um novo ajuste no tape, caso este não já tenha violado seus limites.

Se os limites para ângulo de extinção e tape forem violados simultaneamente, então o ponto de operação que se tenta calcular não é realizável, para as premissas existentes, e novas premissas precisam ser adotadas.

Uma vez calculados a posição do LTC e o ângulo de extinção obtém-se as grandezas U_{dio} , μ , ϕ e Q_d , através das relações apresentadas no apêndice A.

4.4.2.- Curva "E-F".

a) **Características:** os recursos para se elevar a tensão terminal da ECS se esgotam quando são atingidos os limites inferiores para ângulo de extinção e posição do LTC.

Todos os pontos da curva em questão possuem então as características, resumidas a seguir:

$$\tau = \tau_{\min} \quad (19)$$

$$\text{Tap} = \text{Tap}_{\min} \quad (20)$$

No ponto "F", especificamente, a corrente CC atinge o limite mínimo especificado, ou seja:

$$I_d = I_{d\min} \quad (21)$$

Observando a figura 13, percebe-se que a curva em questão aproxima-se bastante de uma curva de tensão constante, definida pelos valores mínimos de tape e ângulo de extinção.

b) **Obtenção da Curva e das Grandezas Auxiliares:** a obtenção desta curva é bem mais simples que a da curva anterior, posto que não só a posição do tape como o ângulo de extinção já são conhecidos. Fazendo-se a corrente variar entre os valores das abcissas dos pontos "E" e "F" calcula-se a valor da tensão CC terminal através das equações (a.2) do apêndice A.

Todas as grandezas auxiliares são obtidas da mesma forma que na curva anterior.

4.4.3.- Curva "F-G".

a) Características: o limite inferior da corrente que flui no elo, é uma das condições de contorno que determinam a região operativa.

Mantendo-se a corrente neste valor é possível reduzir a tensão terminal da ECS, aumentando-se sistematicamente os ângulo de extinção e a posição do tape, até que os limites superiores destas duas grandezas sejam atingidos. Desta forma, todos os pontos desta curva podem ser identificados por:

$$I_d = I_{\min} \quad (22)$$

Adicionalmente, para o ponto "G" tem-se:

$$\text{Tap} = \text{Tap}_{\max} \quad (23)$$

$$\tau = \tau_{\max} \quad (24)$$

b) Obtenção da Curva e das Grandezas Auxiliares: na obtenção desta curva a corrente é mantida constante, fazendo-se variar a tensão no intervalo que corresponde aos pontos "F" e "G".

O ângulo de extinção e a posição do LTC devem ser calculados com o mesmo processo iterativo usado na curva "C-D-E". As demais grandezas auxiliares são calculadas diretamente das equações do

apêndice A.

4.4.4.- Curva "G-A-B".

a) **Características:** os limites máximos da posição do LTC e do ângulo de extinção caracterizam os pontos da curva em questão, ou seja:

$$\tau = \tau_{\max} \quad (25)$$

$$\text{Tap} = \text{Tap}_{\max} \quad (26)$$

Para o ponto "A", a corrente é a nominal, ou seja:

$$I_d = I_{dn} \quad (27)$$

No ponto "B" a maior corrente possível é atingida, o que se traduz em:

$$I_d = I_{d\max} \quad (28)$$

Uma outra característica importante do ponto "B" é a ocorrência do maior consumo de potência reativa de toda a região operativa, em consequência direta dos fatores corrente e ângulo de extinção máximos.

b) **Obtenção da Curva e das Grandezas Auxiliares:** na construção desta curva, a corrente ~~deve variar~~ entre os valores que correspondem aos pontos "G" e "B". Uma vez que ambos, ângulo de

extinção e posição do tape, são grandezas constantes, para todos os pontos da curva, deve ser adotado o mesmo procedimento utilizado na construção da curva "E-F". O mesmo se pode afirmar com relação às grandezas auxiliares.

4.4.5.- Curva "D-A".

a) **Características e Obtenção da Curva:** nesta curva a corrente é mantida em seu valor nominal sendo os valores de tape e ângulo de extinção aumentados, a partir dos valores nominais, até que os limites máximos sejam atingidos em "A". Utiliza-se aqui, o mesmo procedimento adotado na construção e na obtenção das grandezas auxiliares da curva "F-G".

4.4.6.- Curva "C-B".

a) **Características e Obtenção da Curva:** para se obter esta curva a corrente é mantida em seu valor máximo, a partir do ponto "C", e a tensão terminal reduzida. O processo de construção da curva e obtenção das grandezas auxiliares é análogo ao utilizado nas outras retas verticais. As características de cada extremo também já foram apontadas anteriormente.

4.5.- Conclusões.

Da metodologia de dimensionamento proposta e dos pontos desenvolvidos no decorrer do presente capítulo, merecem destaque

os seguintes aspectos:

a) A metodologia das regiões operativas permite a especificação sistemática dos principais equipamentos de Estações Conversoras Série de comutação natural, para o suprimento de pequenas cargas ao longo de rotas de transmissão CCAT.

b) A especificação da ECS requer condições de contorno bem definidas. É necessário conhecer, além dos dados básicos, o comportamento da corrente no elo principal e a evolução da carga a ser suprida.

c) A operação da ECS requer ângulos de extinção elevados, o que implica em maior consumo de reativo pela estação, além de maiores perdas nas válvulas.

d) A reatância de comutação da ECS é significativamente alterada pela posição do LTC. Uma correção linear desta, com a posição do comutador, proporciona uma boa representação do referido efeito.

No capítulo seguinte a metodologia aqui desenvolvida é aplicada a um caso de interesse do setor elétrico brasileiro. Neste sentido é feito o dimensionamento de um ECS de 25 MW, conforme dados e premissas a serem especificados.

5.- Aplicação da Metodologia de Dimensionamento de uma Estação Conversora Série de Comutação Natural.

5.1.- Introdução.

A metodologia desenvolvida no capítulo anterior será agora aplicada no dimensionamento de uma ECS de comutação natural, visando o atendimento de uma carga de 25 MW.

O elo de corrente contínua, que fornecerá a potência necessária a este atendimento, foi definido durante estudos de alternativas de transmissão realizados na ELETRONORTE. Trata-se de uma configuração bipolar, em seu estágio final, de 800 km de extensão. Seus valores nominais de potência e tensão por polo são 500 MW e 350 kV, respectivamente.

Foi também incluído neste capítulo o processo de especificação do compensador síncrono que proverá a tensão CA necessária ao processo de comutação natural.

5.2.- Dados e Premissas.

Os dados relevantes do circuito principal e da ECS estão apresentadas no quadro 1. As premissas básicas do projeto resumem-se em:

- a) O comissionamento do circuito principal e da ECS ocorrem simultaneamente. Nesta ocasião assume-se uma configuração

monopolar com retorno metálico, passando a bipolar conforme a carga exigir.

QUADRO 1 - Dados Básicos para Dimensionamento da ECS.

Circuito Principal	
Tensão (kV)	± 350
Potência (MW/polo)	500
Corrente (A)	1430
Faixa de Corrente (A)	[143,1716]
ECS	
Potência (MW)	25
dx(%)	6
Tensão CA (kV)	$13,8 \pm 5\%$
Frequência do Sistema CA (Hz)	60

b) As cargas máximas e mínimas do inversor principal e da ECS ocorrem simultaneamente, isto é, as curvas diárias de carga apresentam as mesmas características para ambas as localidades.

c) A capacidade máxima de transmissão do elo principal é alcançada 15 anos após o comissionamento. Durante este período não é prevista nenhuma expansão da geração do sistema CA ligado ao inversor principal, ou seja, todo o acréscimo na carga deste sistema será suprido pelo elo.

O quadro 2 apresenta os fluxos máximos e mínimos no elo durante o mencionado período, que foi dividido em subperíodos, de acordo com os estágios presumidos para

o projeto.

QUADRO 2 - Corrente CC e Avaliação da Carga da ECS.

Período	Corrente (kA)		Carga da ECS (MW)	
	max.	min.	max.	min.
1	0.86	0.29	11.2	4.0
2	1.14	0.57	14.6	4.8
3	1.43	0.71	16.7	6.2
4	0.86	0.43	19.0	6.8
5	1.14	0.57	22.4	8.2
6	1.43	0.71	25.0	9.4

d) A carga da ECS, previamente suprida por unidades térmicas, evolui de 11 a 25 MW. Os pontos de operação que a RO deve conter, podem ser obtidos diretamente do quadro 2, assumindo que a carga máxima da ECS e a máxima corrente no elo ocorrem simultaneamente e vice-versa, de acordo com a premissa "b".

O quadro 2 define portanto 12 pontos de operação, ou seja, as combinações previstas dos valores de corrente do elo CC e da carga da ECS.

É necesssário ainda verificar se a RO buscada deve ou não conter os pontos de operação associados às circunstâncias extremas, nas quais as cargas máximas da ECS correspondem às mínimas correntes no elo, e vice-versa. Estas combinações extremas de corrente e carga precisam ser cuidadosamente analisadas pois podem representar situações irreais, ou com remota probabilidade de

ocorrências.

A estratégia adotada foi construir inicialmente a RO que satisfizesse os requisitos do quadro 2, assumindo que máximas e mínimas correntes no elo e cargas da ECS são coincidentes. A seguir verificou-se as situações extremas de possível ocorrência que não estavam contidas nesta RO. Procedeu-se então um ajuste em alguns dos parâmetros, da seguinte forma, até que as condições extremas fossem satisfeitas:

- Aumentou-se r_{max} se o problema era suprir a carga mínima da ECS com corrente máxima no elo.
- Reduziu-se Tap_{min} se o problema era suprir carga máxima da ECS com corrente mínima no elo.

5.3.- Resultados Obtidos.

Inicialmente construiu-se a RO ilustrada na figura 15, limitada inferiormente pela curva "G-A-B", com base nas suposições apresentadas. Essa RO contém as condições operativas do quadro 2.

As condições de carga leve são atendidas por apenas uma das pontes, enquanto que em carga pesada as duas pontes precisam ser ligadas.

O número necessário de posições do comutador sob carga foi 30, com passo de 2%. As faixas de variação do comutador sob carga e do ângulo de extinção são: $Tap_{max} = +18 \times 2\%$; $r_{max} = 40^\circ$;

$$Tap_{min} = -12 \times 2\%; \quad r_{min} = 17^\circ.$$

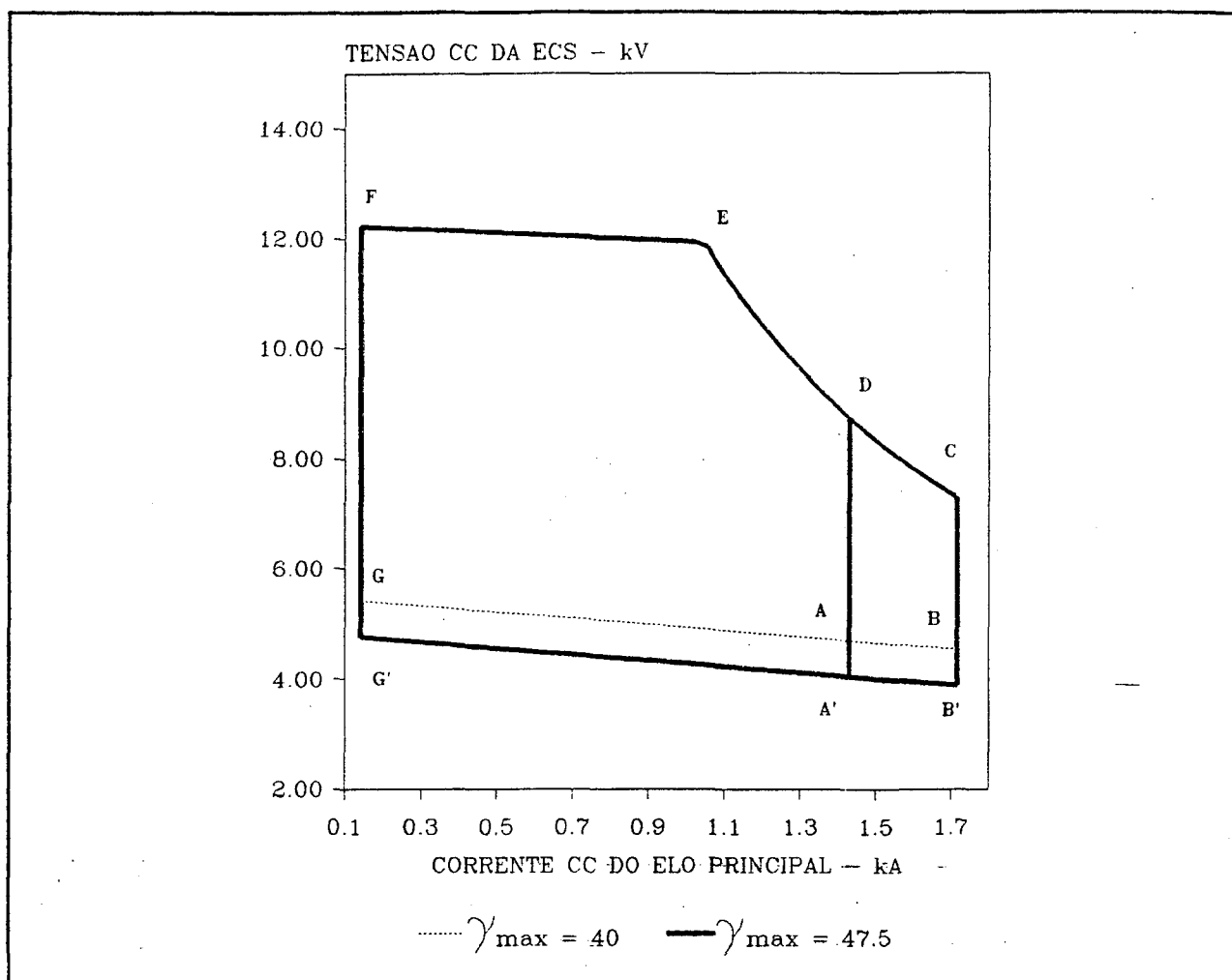


FIGURA 15 - Região Operativa da ECS.

A etapa seguinte foi verificar se esta ECS poderia atender situações extremas envolvendo a corrente CC e a carga da ECS. Inicialmente considerou-se as mínimas correntes listadas no quadro 2, e foi obtida, para cada uma destas correntes, a máxima potência que poderia ser suprida. Tais capacidades deveriam ser maiores ou iguais às máximas cargas previstas para a ECS, também relacionadas no quadro 2. O quadro 3 mostra que alguns problemas foram detectados.

Para analisar estas situações críticas deve-se lembrar que, nos últimos períodos, o sistema CA conectado à inversora principal terá a maior parte de sua carga atendida pelo sistema CC, uma

vez que não há previsão de nenhuma outra expansão de geração. Além disto, a carga máxima ocorre simultaneamente nos sistemas CA conectados à inversora principal e à ECS.

Assim sendo, descartou-se a possibilidade de suprimento de potência máxima pela ECS, com corrente mínima no elo, sob condições normais de operação, para os últimos três períodos.

Nos dois primeiros períodos, apesar da remota possibilidade, a diferença entre a capacidade da ECS e a máxima carga pode ser atendida pela geração local remanescente. Portanto, não há necessidade de se alterar a RO previamente calculada, devido a estes problemas.

Outras situações extremas, listadas no quadro 4, ocorrem quando a ECS tem que suprir sua carga mínima, enquanto a corrente no elo é máxima. Aqui os problemas aparecem quando a carga é menor que a mínima capacidade de suprimento da ECS.

QUADRO 3 - Casos Extremos com Corrente CC Mínima.

Período	Corrente CC Mínima (kA)	Capacidade da ECS (MW)	Carga Max. da ECS (MW)
1	0,28	6,9	11,2(*)
2	0,57	12,6	14,6(*)
3	0,71	17,0	16,7
4	0,43	10,3	19,0(*)
5	0,57	13,6	22,4(*)
6	0,71	20,0	25,0(*)

(*) Capacidade da ECS inferior à carga máxima.

QUADRO 4 - Casos Extremos com Corrente CC Máxima.

Período	Corrente CC Máxima (kA)	Capacidade Mínima da ECS (MW)	Carga Mínima da ECS (MW)
1	0,86	4,3	4,0(*)
2	1,14	5,4	4,8(*)
3	1,43	6,7	6,2(*)
4	0,86	4,3	6,8
5	1,14	5,4	8,1
6	1,43	6,7	9,4

(*) A carga mínima a ser suprida pela ECS é inferior à sua capacidade mínima.

A solução adotada nesse caso foi modificar o valor máximo do ângulo de extinção de 40° para $47,5^\circ$. Essa mudança reduz a capacidade mínima da ECS para valores inferiores aos da mínima carga que ela deverá suprir.

Considerando o pequeno ajuste acima, a RO definitiva, similar à precedente, torna-se mais abrangente, com sua linha inferior deslocada para baixo, conforme pode ser visto na figura 15. O quadro 5 dá as características de alguns dos principais pontos do contorno desta RO. O ponto "H", que aparece na última linha do quadro, será discutido posteriormente.

Os valores nominais da ECS podem ser, então, facilmente determinados. O máximo consumo de potência reativa por ponte de seis pulsos é obtido no ponto "B", sendo 10,3 MVar.

QUADRO 5 - Região Operativa da ECS.

Pontos	Udio (kV)	Ud (kV)	Id (kA)	Pd (MW)	Qd (MVar)	Tape	μ ($^{\circ}$)	τ ($^{\circ}$)
A	7,17	4,05	1,43	5,8	8,4	18	15,5	47,5
B	7,17	3,89	1,72	6,7	10,3	18	18,3	47,5
C	8,56	7,28	1,72	12,5	7,5	7	21,6	19,1
D	9,75	8,74	1,43	12,5	6,1	0	16,2	17,0
E	12,83	11,95	1,05	12,5	4,9	-12	8,1	17,0
F	12,83	12,23	,143	1,7	,56	-12	1,3	17,0
G	7,74	4,77	,143	,68	,83	18	1,6	47,5
H	12,8	11,92	1,14	13,6	5,45	-12	8,7	17,0

Cada transformador conversor deve ter sua potência aparente nominal igual a 13,9 MVA, obtida no ponto "D". Como a máxima potência aparente atingida é de 14,6 MVA, no ponto "C", percebe-se que os transformadores podem ser submetidos a sobrecargas máximas de 5%, o que é aceitável mesmo em regime permanente.

O quadro 6 apresenta um sumário da especificação básica da ECS. A tensão secundária do transformador (lado da válvula) e sua reatância nominal foram calculadas com as relações mostradas no apêndice A.

Pelos números do quadro 5, se a corrente estiver próxima a seu valor nominal, a menor carga que a ECS poderá suprir é de cerca de 6 MW.

QUADRO 6 - Especificação Básica da ECS.

Pontes Conversoras			
Número de pontes de seis pulsos			2
Corrente (kA)	nominal		1,43
	faixa		[0,143;1,716]
Potência (MW/ponte)			12,5
Potência Reativa máxima(MVAr)			10,3
Ângulo de Extinção	nominal		17°
	faixa		[17°;47,5°]
Transformadores Conversores			
Número de Unidades(*)			2
MVA por unidade			13,9
Reatância (Ω)			0,43
Faixa do Comutador sob Carga			[+18;-12]x 2%
Relação de Transformação			13,8/7,2

(*) - Os enrolamentos de baixa devem estar ligados um em delta outro em estrela.

Se porventura a carga da ECS for menor que 6 MW devido, por exemplo, à perda de um alimentador ou fato semelhante, pode-se permitir que τ seja levado a valores maiores que o limite máximo de 47,5°. Este procedimento é aceitável desde que temporariamente.

É recomendável, portanto, que seja mantida alguma geração térmica local, que permita o desligamento da ECS se essas ocorrências perdurem por mais tempo. Para o projeto em pauta, 6 MW de máquinas térmicas garantem o atendimento à carga.

Uma outra estratégia poderia evitar os elevados ângulos de extinção, no caso de cargas inferiores a 6 MW. Como a ECS possui duas pontes de seis pulsos uma destas poderia operar como retificador. Desta forma, uma parte da potência convertida pela ponte inversora seria novamente introduzida na linha CC. A implementação desta estratégia requer funções de controle específicas.

5.4.- Capacidade da ECS em Fornecer Potências Maiores que a Nominal.

Voltando à RO da figura 15, foi visto anteriormente que a curva C-D-E é a curva de potência nominal constante, cujo valor corresponde à maior potência prevista para ser atendida pela ECS.

Entretanto, de uma observação mais atenta nota-se que dentre todos os pontos que compõem esta curva, apenas no ponto "E" foram esgotados todos os recursos para elevação da tensão CC terminal, e conseqüentemente da potência, o que significa que somente o ponto "E" tem como características ângulo de extinção e tape mínimos.

Desta forma, a linha C-D-E não representa um limite rígido para a RO e que pontos acima desta podem ser alcançados pela ECS, sem violar os limites estabelecidos para ângulo de extinção e tape, resultando em maiores potências fornecidas.

A figura 16 apresenta a região operativa complementar, no plano $V_d \times I_d$, que engloba os possíveis pontos com potência maior que a

nominal, obtida para a configuração definitiva da ECS em estudo. Esta região é limitada pela curva C-D-E e por duas outras curvas.

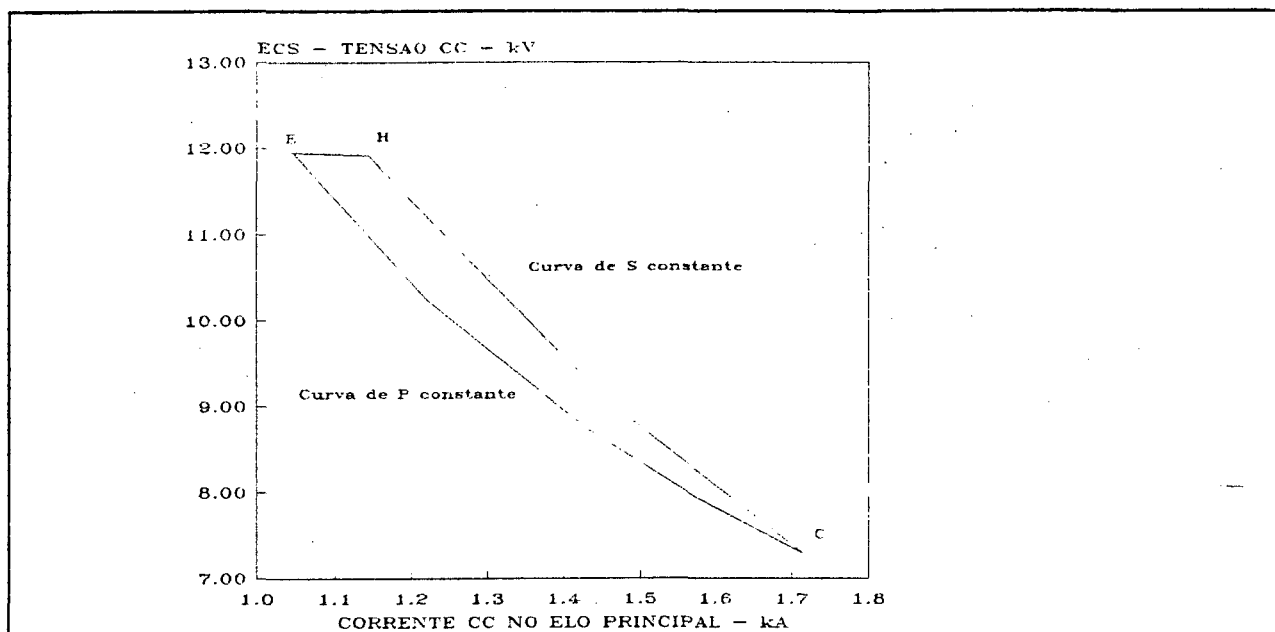


FIGURA 16 - Região Operativa Complementar da ECS.

A curva "E-H" nada mais é que o prolongamento da curva E-F da RO original, sendo caracterizada, portanto, por ângulo de extinção e tape mínimos, que são os dois fatores que limitam a elevação da tensão CC terminal e da potência. O processo de obtenção desta curva já foi visto anteriormente.

O outro fator limitante, utilizado na determinação da curva "H-C" é a potência aparente máxima para a qual foram dimensionados os transformadores, e que corresponde a uma sobrecarga de 5% à potência aparente calculada no ponto "C", alcançada no ponto "C" da RO da figura 15.

As características do ponto "H" podem ser encontradas na última linha do quadro 5. Observando a coluna referente à potência ativa,

nota-se que a ECS não pode fornecer potências muito maiores que a nominal, a menos que sejam admitidas sobrecargas nos transformadores conversores.

5.5.- Especificação do Compensador Síncrono.

A função básica do compensador síncrono (CS) é prover a tensão CA necessária ao funcionamento da estação de comutação natural e seu dimensionamento requer importantes cuidados.

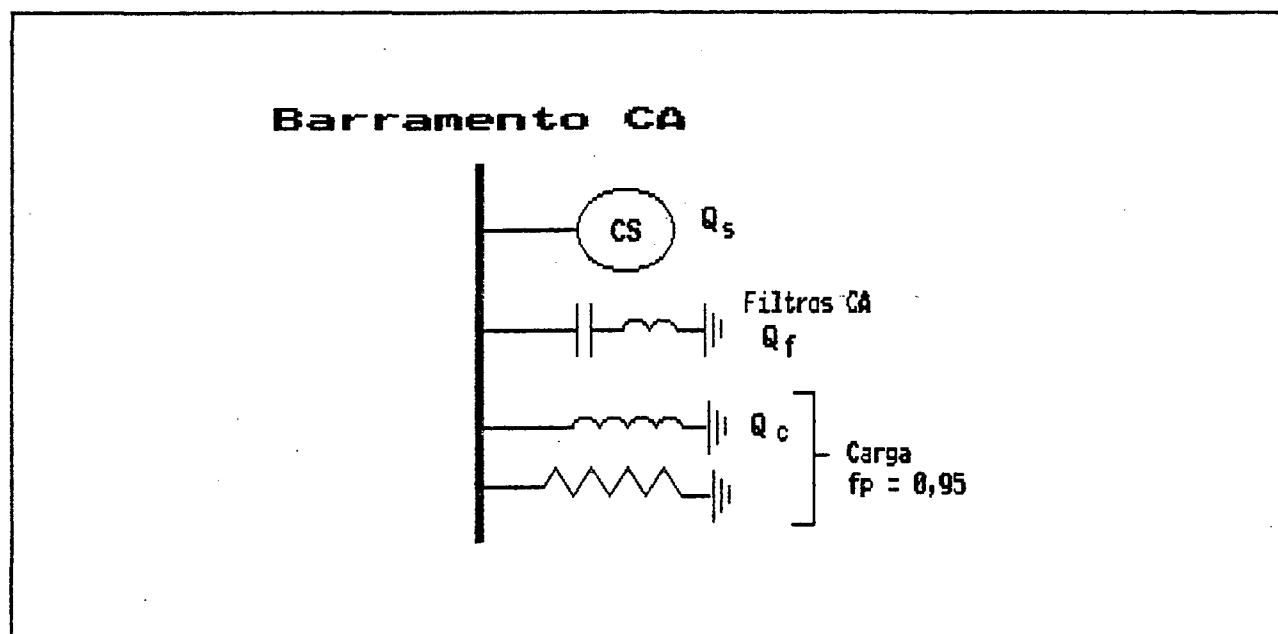


FIGURA 17 - Barramento CA da ECS.

A figura 17 mostra o barramento CA da ECS, onde estão ligados, além do compensador síncrono (CS), os filtros CA e o sistema CA, aqui representado exclusivamente pela carga.

Elementos indutivos e capacitivos ligados a uma mesma barra implicam na existência de uma frequência natural de ressonância. Os filtros requeridos pela ECS aliados ao baixo nível de curto-circuito do sistema CA, no caso, uma simples carga, produzem

ressonâncias de baixa ordem, que tendem a se aproximar da frequência fundamental. A especificação da reatância subtransitória do CS (x_d'') deve ser feita de forma a evitar ressonâncias perigosas, de ordem inferior à terceira.

A ordem da ressonância do circuito da figura 17 é dada por:

$$O = \frac{w_0}{w_1} = \left(\frac{Q_s + Q_c}{Q_f} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (29)$$

onde identificam-se:

O - ordem da ressonância.

w_0 - frequência de ressonância.

w_1 - frequência fundamental.

$Q_s = \frac{U_h^2}{x_d''}$ - potência reativa associada à reatância subtransitória do síncrono.

Q_f - potência reativa dos filtros.

Q_c - porção reativa da carga.

O cálculo da reatância subtransitória do CS utilizou a relação (29) e foi baseado nas seguintes premissas:

- Assumiu-se a carga máxima de 25 MW, com fator de potência de 95%.

- Para os filtros CA, até agora não dimensionados, admitiu-se um montante equivalente a 60 % da potência ativa nominal da ECS, o que corresponde a 15 MVar.

O valor obtido para x_d'' foi de 1,50 Ω .

Se a ECS for subitamente desligada um dos efeitos esperados é uma sobretensão no barramento CA, devido aos filtros ainda conectados a ele. Esta persistirá até que o controle de tensão do CS atue ou que o sistema local entre em colapso, já que não há nenhuma outra fonte de potência ativa disponível.

Com a reatância subtransitória do CS já calculada é possível determinar-se a referida sobretensão, em regime permanente, para diversas condições operativas, através da relação abaixo. Tais valores calculados servem para a avaliação da reatância especificada para o CS.

$$\frac{U_h'}{U_h} = \left[\left(1 + \frac{Q_{ecs}^2}{S_e} \right) + \left(\frac{P_{ecs}^2}{S_e} \right)^{\frac{1}{2}} \right], \quad (30)$$

onde:

P_{ecs} e Q_{ecs} são as potências ativa fornecida e reativa consumida pela ECS, antes do desligamento.

$S_e = Q_s - Q_f$ é a potência efetiva de curto-circuito, considerando somente a reatância subtransitória do CS e os filtros ligados antes do desligamento. Observa-se que a carga não foi levada em conta neste cálculo, o que não introduz grandes diferenças nos resultados.

O carregamento alcançado pela ECS no ponto "C" do quadro 5, representa a condição mais crítica para efeitos de sobretensões devidas a desligamentos. Nesta situação a sobretensão calculada foi de 15 %.

Um outro efeito do desligamento da ECS é a queda da frequência do sistema local, cujo único suporte passa a ser a inércia do CS. A inércia do CS pode ser dimensionada para limitar as referidas quedas de frequência.

A partir da equação "swing" de uma máquina síncrona, o fator "H" do CS é fornecido pela relação seguinte:

$$H = \frac{P_{ecs}}{2} \cdot \frac{t}{w}, \quad (31)$$

onde identificam-se:

w - queda de frequência em pu.

t - intervalo de tempo especificado.

O fator "H" do CS foi especificado para não permitir quedas de frequência superiores a 20 % da frequência nominal, se a ECS ficar totalmente desligada por 500 ms, em carga máxima (25 MW). Obteve-se para "H", através da relação (31), o valor de 1,25 s.

Os resultados obtidos para x''_d e "H" são típicos de compensadores na faixa entre 20 e 25 MVar. Dentro desta faixa, selecionou-se um

CS de 25 MW, cuja especificação está resumida quadro 7.

QUADRO 7 - Especificação do Compensador Síncrono.

Tensão Nominal (kV)	13,8
Frequência Nominal (Hz)	60
Potência Nominal (MVar)	25
Inércia: M (J)	31
H (s)	1,25
Reatância Subtransitória (Ω)	1,5
(pu)	0,20

O dimensionamento realizado para o compensador síncrono fornece, em linhas gerais, os valores nominais deste equipamento. Contudo, por se tratar de um equipamento de custo elevado, a otimização de suas dimensões pode trazer grandes economias à instalação como um todo. Um compensador síncrono de menor porte, combinado a um filtro de segunda harmônica, por exemplo, pode ser tecnicamente uma boa solução e com menor custo.

Cabe ressaltar que não pertence ao escopo deste trabalho a otimização das dimensões do compensador síncrono.

5.6.- Conclusões.

Alguns aspectos importantes relacionados ao dimensionamento realizado neste capítulo são transcritos a seguir.

- a) A configuração da ECS com duas pontes de seis pulsos e

dois transformadores conversores mostrou-se adequada para a aplicação estudada, que compreende a alimentação de uma carga de 25 MW, a partir de um elo CC bipolar com tensão nominal de ± 350 kV e potência de 1000 MW.

b) Duas alternativas foram levantadas para garantir o atendimento de cargas inferiores à mínima capacidade de suprimento da ECS em pauta. A primeira delas é a manutenção de um montante de 6 MW, já disponível, de geração térmica local. A segunda alternativa é a adoção de esquemas especiais de controle que permitam uma das pontes operar como retificador e a outra como inversor, simultaneamente.

c) O funcionamento da ECS de comutação natural, quando ligada a um sistema CA de baixa potência de curto-circuito, implica na necessidade de instalação de um compensador síncrono. No caso estudado, o porte deste equipamento (25 MVar) foi equivalente ao montante da carga suprida (25 MW), o que sem dúvida encarece a instalação.

d) Entretanto, as dimensões do compensador síncrono podem ser otimizadas, de forma a minimizar os custos da ECS, sem comprometer o desempenho técnico esperado. Ressalta-se não ter sido esta uma preocupação coberta por este trabalho.

A especificação da ECS em questão será complementada, no capítulo que se segue, com uma análise dos harmônicos de corrente gerados pela conversora série e o dimensionamento dos filtros necessários à mitigação dos efeitos nocivos introduzidos por estes harmônicos na rede CA local.

6.- Harmônicos e Filtros CA.

6.1.- Introdução.

Dando prosseguimento aos estudos de dimensionamento de uma ECS iniciados no capítulo anterior, esta parte do trabalho dedica-se às investigações referentes a harmônicos por ela gerados, com vistas à especificação dos filtros, quando necessários. Indicam-se as referências [1] e [2] como base teórica para o que será desenvolvido a seguir.

Como qualquer estação conversora de corrente contínua convencional, a ECS produz harmônicos de corrente que, ao serem injetados na rede CA, causam efeitos indesejados tais como aquecimento excessivo em capacitores e máquinas, interferências nos sistemas de telecomunicações, além de instabilidade nos próprios controles da estação.

Estes efeitos podem se propagar por longas distâncias, em função da topologia da rede, sendo que o de mais difícil eliminação é a interferência telefônica. Para evitar a penetração dos harmônicos na rede, ou pelo menos mantê-los em níveis aceitáveis, são necessários os filtros.

No capítulo que ora se inicia, são avaliados os harmônicos gerados pela ECS em dimensionamento e é estabelecida uma configuração adequada de filtros CA.

Cabe ressaltar que as avaliações feitas aqui compõem uma

investigação preliminar sobre harmônicos e filtros, considerando as peculiaridades da ECS em questão, bem como outras hipóteses que serão apresentadas, convenientemente, no decorrer do trabalho. Foram aceitas, ainda, algumas aproximações que simplificam sobremaneira os cálculos realizados, sem comprometer, entretanto, a qualidade dos resultados e as conclusões advindas dos mesmos.

6.2.- Metodologia Utilizada.

Os harmônicos de corrente foram calculados para diversos pontos de operação, definidos a partir da região operativa obtida no Capítulo 3, para configurações com uma ou duas pontes conversoras de seis pulsos. É importante lembrar que os enrolamentos dos transformadores ligados às válvulas são conectados um em estrela e o outro em triângulo, o que reduz naturalmente o conteúdo harmônico da corrente CA durante a operação com duas pontes de seis pulsos.

A partir dos resultados obtidos foram selecionados os pontos da RO que correspondem aos conteúdos harmônicos mais elevados. Foram encontrados dois pontos críticos, em termos de harmônicos gerados, e que podem ser visualizados na figura 15 do capítulo 5. O primeiro deles é o ponto "C", correspondente à corrente máxima prevista. O segundo é o ponto "E", o qual apresenta ângulo de comutação reduzido combinado com um valor elevado de corrente CC.

Os filtros foram então dimensionados com base nos harmônicos críticos identificados e nos índices de desempenho adotados como critérios de performance.

6.2.1.- Cálculo dos Harmônicos.

O cálculo dos harmônicos foi efetuado com o uso do programa de computador "HARMON", de propriedade da empresa Asea Brown Boveri, que utiliza a metodologia exposta a seguir.

A partir dos dados que caracterizam os pontos de operação a serem simulados, o programa obtém a forma de onda da corrente injetada na rede CA pela conversora. Utilizando um analisador de Fourier são obtidos então aos valores rms de cada componente harmônico.

Para os harmônicos característicos, ou seja os de ordem $6n \pm 1$, para uma ponte de seis pulsos, e $12n \pm 1$, para uma de doze pulsos, onde $n = 1, 2, 3, \dots$, a forma de onda da corrente CA a ser decomposta baseia-se nas seguintes hipóteses:

- . As tensões CA nas três fases que alimentam a estação são puramente senoidais, defasadas de 120° , e na frequência fundamental.

- . A corrente contínua é perfeitamente constante e sem "ripple".

- . As válvulas são acionadas em intervalos de tempo de $1/6$ de ciclo, ou seja, os ângulos de disparo são iguais e constantes (disparo simétrico).

- . As impedâncias de comutação são iguais para as três

fases, o que implica em ângulos de comutação iguais.

Na obtenção dos harmônicos característicos são necessárias as seguintes informações, relativas a cada um dos pontos de operação de interesse:

- . Configuração da estação : uma ou duas pontes de seis pulsos, o que corresponde a operações com seis ou doze pulsos, respectivamente.

- . Dados referentes ao sistema CC: U_d , U_{dio} , I_d , d_x e τ .

- . Dados referentes ao sistema CA: U_n , w (frequência).

As quatro hipóteses adotadas no cálculo dos harmônicos característicos não são satisfeitas na realidade. Como consequência harmônicos de ordens outras que não as características são também gerados. Estes harmônicos normalmente são de magnitude inferior aos característicos de ordem adjacente.

Os principais fatores responsáveis pelos harmônicos não característicos são:

- . Desbalanço entre as impedâncias de cada fase do transformador conversor: levantamentos feitos pelo fabricante Asea Brown Boveri indicam que a reatância de cada fase e, conseqüentemente, d_x , pode ser considerada como uma variável aleatória que obedece uma distribuição normal, cujo desvio padrão varia entre 0,5 % e 0,7 % da reatância nominal.

. Assimetria entre os instantes de disparo das válvulas:
 Dados fornecidos pelo mesmo fabricante indicam que
 o instante de disparo obedece uma distribuição normal com
 desvio padrão dado por:

$$\sigma = 360.f_0.10^{-5}/\sqrt{n} , \quad (32)$$

onde:

n é o número de tiristores por válvula.

f_0 é a frequência nominal.

. Desbalanço entre fases na tensão CA. Este desbalanço é
 introduzido nos cálculos através de uma componente de
 seqüência negativa de amplitude constante e ângulo de fase
 aleatório.

Para cálculo dos harmônicos não-característicos, as distribuições
 estatísticas das grandezas d_x e τ , definidas acima, são
 consideradas. O programa utiliza o conhecido método de Monte Carlo
 para a obtenção dos valores máximos dos componentes harmônicos,
 referentes a cada ponto de operação simulado.

6.2.2.- Modelagem da Rede CA.

O modelo em círculo, ilustrado na figura 18, foi o adotado para
 representação do sistema CA no dimensionamento dos filtros. Este
 modelo indica, em última análise, o comportamento da impedância
 equivalente de rede CA, — em função de um parâmetro independente
 que é a frequência, para as principais condições de carga
 vislumbradas.

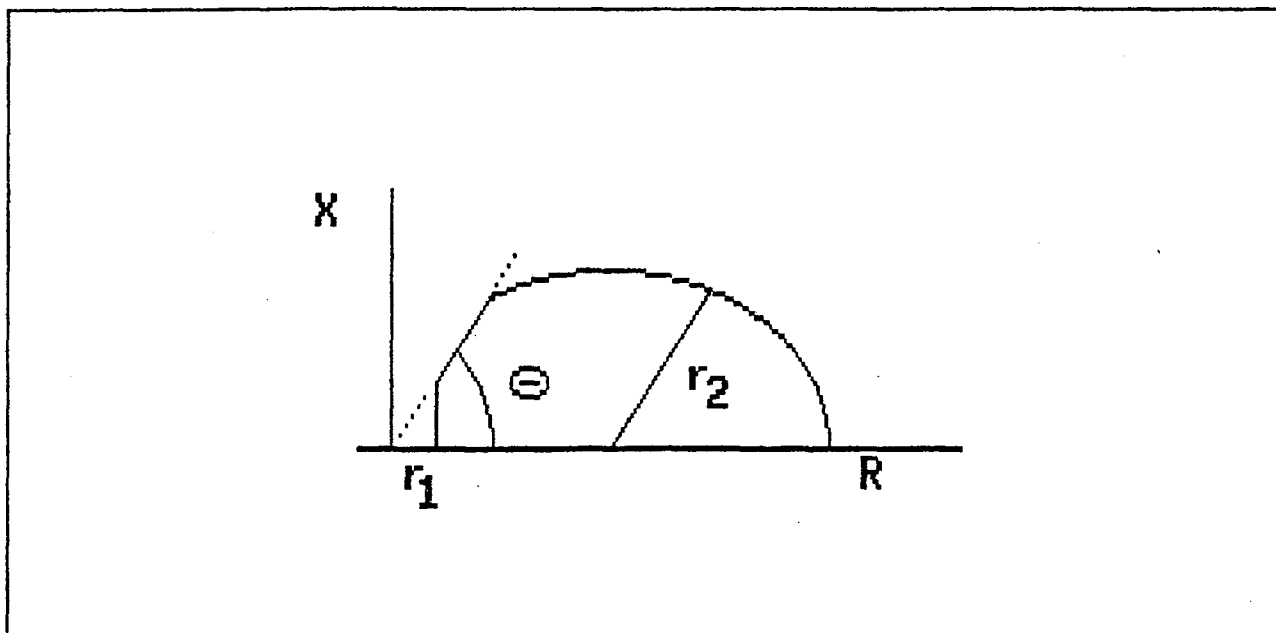


FIGURA 18 - Modelo Circular.

A rede CA da ECS em estudo resume-se a uma carga ligada diretamente na barra CA da estação, representada aqui por uma resistência em paralelo com uma indutância, conforme ilustra a figura 17 do capítulo anterior.

Primeiramente foram determinadas as características da carga, em função da frequência, para condições de carga pesada e leve. Obtiveram-se, desta forma, os parâmetros r_1 , r_2 e θ do modelo circular.

6.2.3.- Tipos de Filtros Utilizados.

Visando a filtragem dos harmônicos de corrente foram utilizados dois tipos de filtros básicos, cujas principais características são apresentadas abaixo.

a) Fitro do Tipo Passa-Faixa (PF).

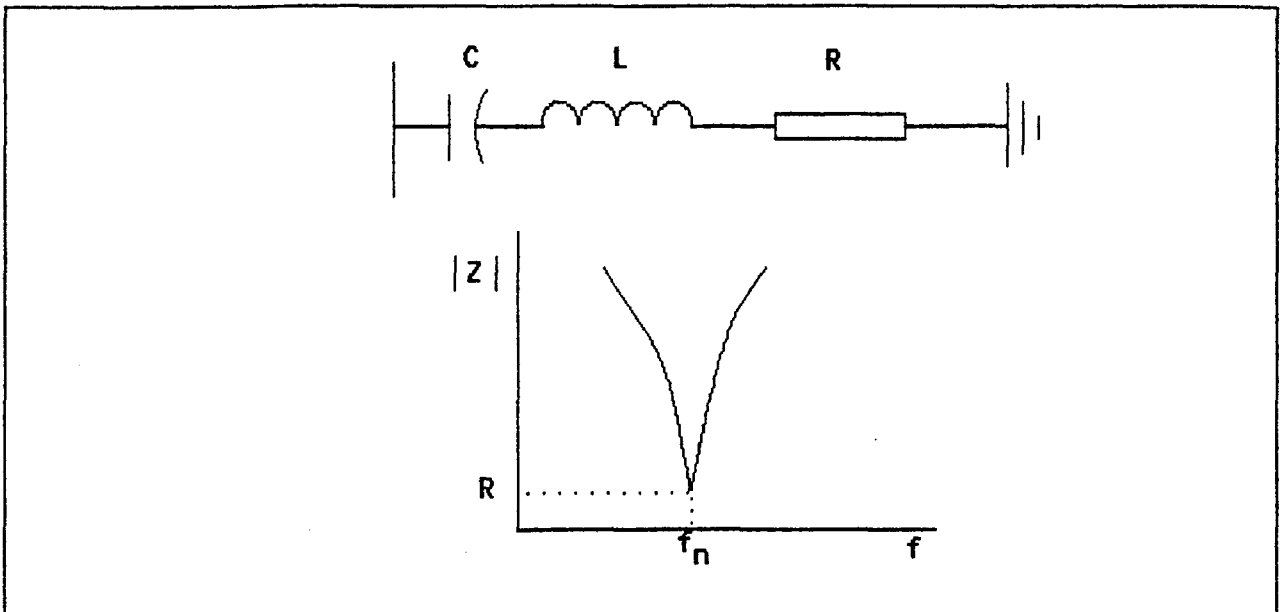


FIGURA 19 - Filtro Passa-Faixa.

Este filtro consiste em uma ressonância série, conforme mostrado na figura 19. Sua impedância característica é dada por:

$$Z_{pf} = R + j(\omega L - 1/\omega C) \quad (33)$$

A frequência de ressonância é expressa por:

$$\omega_n = 1/\sqrt{LC} \quad (34)$$

O fator de qualidade do filtro é calculado pela seguinte relação:

$$q = (\omega_n L) / R \quad (35)$$

Valores típicos para o fator de qualidade de filtros PF variam de 30 a 90. Pela sua característica, estes filtros devem ser utilizados para filtrar os harmônicos mais intensos, ou seja, os característicos de menor ordem.

b) Filtros Tipo Passa-Alta (PA).

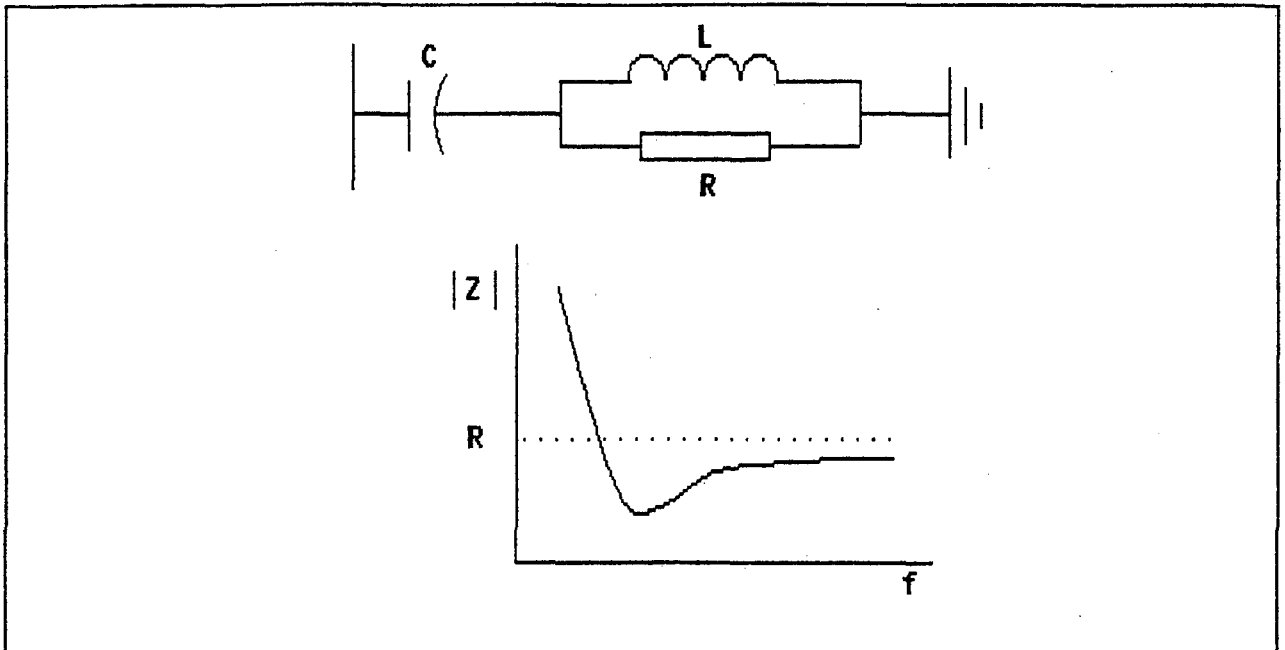


FIGURA 20 - Filtro Passa-Alta.

Os filtros PA apresentam uma baixa impedância em uma faixa de frequência mais abrangente. Os filtros de segunda ordem, ilustrados na figura 20, são os mais utilizados. A impedância característica é dada por:

$$Z_{pa} = \frac{1}{j\omega C} + \frac{1}{(1/R + 1/j\omega L)} \quad (36)$$

Para efeitos de cálculo a frequência angular de ressonância pode ser obtida pela relação que se segue:

$$\omega_r = 1/\sqrt{LC} \quad (37)$$

A frequência de ressonância é normalmente ajustada no valor intermediário ao par de frequências características correspondentes aos harmônicos que se deseja filtrar.

O fator de qualidade é expresso por:

$$q = R/(w_r L) \quad (38)$$

Valores típicos para o fator de qualidade variam entre 2 e 10.

6.2.4.- Metodologia de Dimensionamento dos Filtros.

Partindo dos harmônicos previamente calculados, referentes aos pontos de operação críticos, é calculada a tensão que cada um destes harmônicos produz na barra CA da estação, estando nela conectados a carga, o compensador síncrono, os filtros e a injeção harmônica, que representa a conversora.

Foram usadas algumas figuras de mérito como critérios de avaliação de desempenho em cada ponto de operação simulado, e concomitante ajuste dos filtros. Essas figuras, definidas abaixo, medem a distorção harmônica da tensão na barra CA e a interferência telefônica.

a) Distorção Harmônica Individual (DIND):

$$DIND = U_1 / U_n \cdot 100\% \quad (39)$$

onde,

U_n é a tensão CA na frequência fundamental

U_n é a tensão harmônica de ordem "n"

b) Distorção Linear (DLIN):

$$DLIN = \sum_{i=2}^m DIND \quad (40)$$

O valor utilizado para m é normalmente 50.

c) Distorção Quadrática (DQ):

$$DQ = \left(\sum_{i=2}^m DIND^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (41)$$

d) Interferência Telefônica (TIF):

Os ruídos induzidos nas linhas de telecomunicações foram estimados por meio de uma grandeza ponderada, a qual considera as frequências sensíveis ao ouvido humano e equipamentos telefônicos de acordo com a norma americana (ANSI).

$$TIF = \left(\sum_{i=1}^m (U_i/U_h \cdot F_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (42)$$

onde,

$$F_i = C_i \cdot 5 \cdot i \cdot f_0$$

f_0 é a frequência fundamental

C_i é o fator de ponderação mencionado, listado no quadro 8.

Os cálculos foram efetuados com o uso de uma ferramenta computacional da Asea Brown Boveri de nome "HAP", que simula o circuito da figura 21, onde identificam-se três impedâncias equivalentes que correspondem aos filtros (f), rede (r) e ao síncrono (s). Como resultados o programa fornece as figuras de mérito recém abordadas.

Os filtros, definidos como dados de entrada, foram ajustados de forma a alcançar o desempenho requerido. O compensador síncrono

foi representado por sua reatância subtransitória.

QUADRO 8 - Fatores de Ponderação de Interferência Telefônica.

Freq. (Hz)	Ci	Freq. (Hz)	Ci
60	0,002	1560	0,871
120	0,017	1620	0,860
180	0,033	1680	0,840
240	0,087	1740	0,841
300	0,150	1800	0,841
360	0,222	1860	0,841
420	0,310	1920	0,841
480	0,396	1980	0,841
540	0,489	2040	0,841
600	0,597	2100	0,841
660	0,685	2160	0,841
720	0,767	2220	0,841
780	0,862	2280	0,841
840	0,912	2340	0,841
900	0,967	2400	0,841
960	0,977	2460	0,841
1020	1,000	2520	0,832
1080	1,000	2580	0,822
1140	0,988	2640	0,804
1200	0,977	2700	0,776
1260	0,960	2760	0,750
1320	0,944	2820	0,724
1380	0,923	2880	0,692
1440	0,924	2940	0,668
1500	0,891	3000	0,645

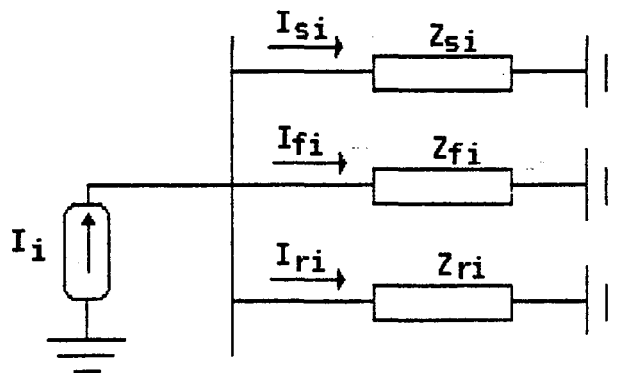


FIGURA 21 - Circuito para Estudo de Distorções Harmônicas.

Quanto à rede CA, o programa atua no sentido de selecionar o valor de impedância contida no lugar geométrico apresentado na figura 18, que corresponda ao máximo valor da corrente injetada na rede. Para entender melhor este procedimento vale observar novamente o circuito da figura 21. A corrente injetada na rede é dada por:

$$I_{r1} = \frac{Z_{s1} \cdot Z_{f1}}{Z_{r1} \cdot Z_{s1} + Z_{f1} \cdot Z_{s1} + Z_{r1} \cdot Z_{f1}} \cdot I_n \quad (43)$$

onde,

Z_{s1} é a impedância subsíncrona do síncrono.

Z_{f1} é a impedância do filtro na frequência harmônica de ordem "n".

Z_{r1} é a impedância harmônica da rede, pertencente ao lugar geométrico definido.

I_1 e I_{r1} são as correntes harmônicas gerada pela ECS e injetada na rede respectivamente.

O programa então escolhe a impedância da rede pertencente ao modelo circular, de forma a minimizar o denominador da expressão (43) e com isto, maximizar a corrente injetada na rede.

Um cuidado especial relacionado a ressonâncias de baixa ordem entre os filtros, o compensador síncrono e a rede CA deve ser tomado, principalmente quando os sistemas CA alimentados pela ECS são fracos, ou seja, possuem baixa potência de curto-circuito. Muitas vezes são necessários filtros especiais, sintonizados nestas frequências, a fim de evitar as grandes distorções que podem ser causadas.

6.3.- Resultados Obtidos.

Serão apresentados a seguir, de uma forma sistemática, os dados, critérios e premissas assumidas, bem como os resultados alcançados, na determinação dos componentes harmônicos de corrente, e no arranjo de filtros CA mais adequado para a ECS em pauta. Todos os cálculos realizados basearam-se na metodologia recém apresentada.

6.3.1.- Cálculo dos Harmônicos de Corrente.

a) Dados Utilizados no Cálculo dos Harmônicos CA .

Os dados referentes a cada ponte de seis pulsos estão englobados no quadro 9. Todas estas grandezas já foram discutidas no capítulo anterior.

Algumas observações são cabíveis aqui. O desvio padrão adotado para d_x corresponde exatamente a 7% do valor nominal. Já o utilizado para o ângulo de extinção, obtido através da relação (32), corresponde a um número de tiristores igual a 5, em cada válvula.

Cabe aqui um comentário importante com relação a d_x . Para fins de cálculos de harmônicos foi utilizado somente o valor nominal desta grandeza. Entretanto, como já foi visto no capítulo anterior, a reatância de comutação varia com a posição do LTC. A faixa de variação aproximada de d_x , em

função da posição do comutador, utilizada no capítulo 3, é de 4,56 a 8,16, o que corresponde a 76 e 136% do valor nominal, respectivamente.

QUADRO 9 - Dados Referentes ao Sistema CC.

U _{dn} (kV)		8,74
U _{dion} (kV)		9,75
I _{dn} (kA)		1,43
dx (%)	nom.	6,0
	(*) σ	0,042
τ (graus)	min.	17°
	nom.	18°
	máx.	19°
	(*) σ	0,095

(*) σ - desvio padrão

A validação dos resultados obtidos depende, portanto, da forma com que a amplitude dos harmônicos de corrente variam com d_x .

Segundo a referência [2], o fato de calcular os harmônicos usando d_x igual a 6% ao invés de 4.56%, produz reduções em suas amplitudes, que variam de 2.5%, para os de menor ordem, chegando a 15% para os de maior ordem. Para harmônicos de ordem superior ao 25º, verifica-se, ao contrário, uma amplificação de até 6%.

Conclui-se, portanto, que os erros cometidos podem ser significativos, dependendo da ordem do harmônico em questão. Entretanto, estes erros não comprometem os objetivos da

análise ora apresentada, que visa exclusivamente um dimensionamento preliminar dos filtros. No caso de uma análise mais profunda, os valores corretos de d_r devem ser considerados.

Os pontos de operação simulados, que correspondem aos maiores conteúdos harmônicos na corrente CA e ao ponto nominal de operação, têm suas características apresentadas no quadro 10. Tais valores referem-se a uma única ponte de seis pulsos. Quando se tratar do modo de operação com duas pontes de seis pulsos, as tensões e potências devem ser dobradas.

QUADRO 10 - Pontos de Operação Simulados.

Ponto	Tensão CC (kV)	Corrente CC (kA)	Potência (MW)	Gama (graus)
C	7.28	1.72	12.5	19
D	8.74	1.43	12.5	17
E	11.94	1.05	12.5	17

São ainda necessários para o cálculo dos harmônicos, alguns dados referentes ao sistema CA terminal da ECS, agrupados no quadro 11. Como pode ser observado, são fornecidos nesta tabela, além da tensão CA e frequência nominais, a componente de sequência negativa da tensão, para cálculo dos harmônicos não característicos.

QUADRO 11 - Dados Referentes ao Sistema CA Terminal.

U _{hnom} (kV)	13.8
U _{hneg} (pu)	0.005
freq. (Hz)	60

b) Harmônicos Calculados.

Os valores rms dos harmônicos característicos e não característicos, injetados na barra CA da estação, em Ampères, encontram-se relacionados no quadro 12.

Para cada ponto de operação (C, D e E) correspondem duas colunas, sendo uma referente à configuração com uma ponte de seis pulsos (c.I) e a outra referente à configuração com duas pontes (c.II), correspondente ao modo de operação em doze pulsos.

QUADRO 12 - Máximas Correntes Harmônicas Calculadas.

Ponto	C		D		E	
Ordem	c.I	c.II	c.I	c.II	c.I	c.II
2	0.39	0.53	0.42	0.56	0.45	0.60
3	2.64	2.56	2.22	2.13	1.77	1.72
4	0.40	0.59	0.44	0.64	0.48	0.70
5	107.55	1.44	110.03	1.17	111.36	0.93
6	0.39	0.67	0.45	0.76	0.50	0.86
7	67.86	1.32	73.15	1.12	76.75	0.91
8	0.30	0.45	0.37	0.54	0.44	0.65
9	1.94	1.86	1.84	1.74	1.60	1.55
10	0.22	0.30	0.30	0.40	0.38	0.51
11	28.43	56.71	37.01	73.28	43.85	87.57
12	0.16	0.24	0.26	0.38	0.36	0.53
13	17.39	34.68	26.45	52.33	34.28	68.51
14	0.10	0.13	0.21	0.28	0.32	0.43
15	1.08	1.10	1.25	1.22	1.30	1.28
16	0.05	0.07	0.17	0.25	0.31	0.46
17	4.90	0.57	12.38	0.63	21.34	0.65
18	0.03	0.06	0.13	0.21	0.30	0.51
19	4.97	0.48	7.80	0.55	16.67	0.62
20	0.06	0.09	0.07	0.09	0.23	0.34
21	0.63	0.63	0.75	0.71	0.95	0.94
22	0.08	0.10	0.02	0.02	0.18	0.24
23	5.91	11.78	3.15	6.32	9.65	19.22
24	0.09	0.13	0.04	0.06	0.14	0.20
25	5.54	11.08	3.86	7.74	7.05	13.96
26	0.09	0.12	0.06	0.09	0.10	0.14
27	0.59	0.58	0.51	0.51	0.66	0.64
28	0.08	0.13	0.09	0.13	0.07	0.11
29	4.10	0.35	4.53	0.31	3.14	0.33
30	0.07	0.12	0.10	0.17	0.04	0.06
31	3.02	0.33	4.36	0.30	1.96	0.30
32	0.04	0.06	0.10	0.14	0.03	0.05
33	0.45	0.45	0.49	0.48	0.45	0.42
34	0.02	0.02	0.09	0.12	0.05	0.07
35	1.44	2.86	3.80	7.48	2.72	5.39
36	0.02	0.03	0.07	0.10	0.05	0.08
37	1.82	3.64	3.26	6.41	3.04	6.04
38	0.04	0.05	0.07	0.09	0.08	0.11
39	0.36	0.37	0.42	0.41	0.39	0.39
40	0.05	0.08	0.06	0.09	0.10	0.14
41	2.09	0.23	1.99	0.24	3.22	0.23
42	0.06	0.10	0.04	0.07	0.11	0.19
43	1.99	0.23	1.37	0.22	3.10	0.23
44	0.06	0.08	0.02	0.03	0.10	0.15
45	0.34	0.34	0.33	0.31	0.39	0.39
46	0.05	0.06	0.03	0.04	0.10	0.13
47	1.60	3.16	1.31	2.63	2.88	5.73
48	0.04	0.05	0.04	0.06	0.10	0.14
49	1.22	2.42	1.52	3.03	2.66	5.32

6.3.2. Dimensionamento dos Filtros.

a) Modelo da Rede CA:

A modelagem adotada para a carga a ser suprida pela ECS é apresentada na figura 22. Os componentes R e L podem então ser obtidos, considerando os valores máximo e mínimo da referida carga, e o fator de potência especificado. O quadro 13 resume os valores utilizados.

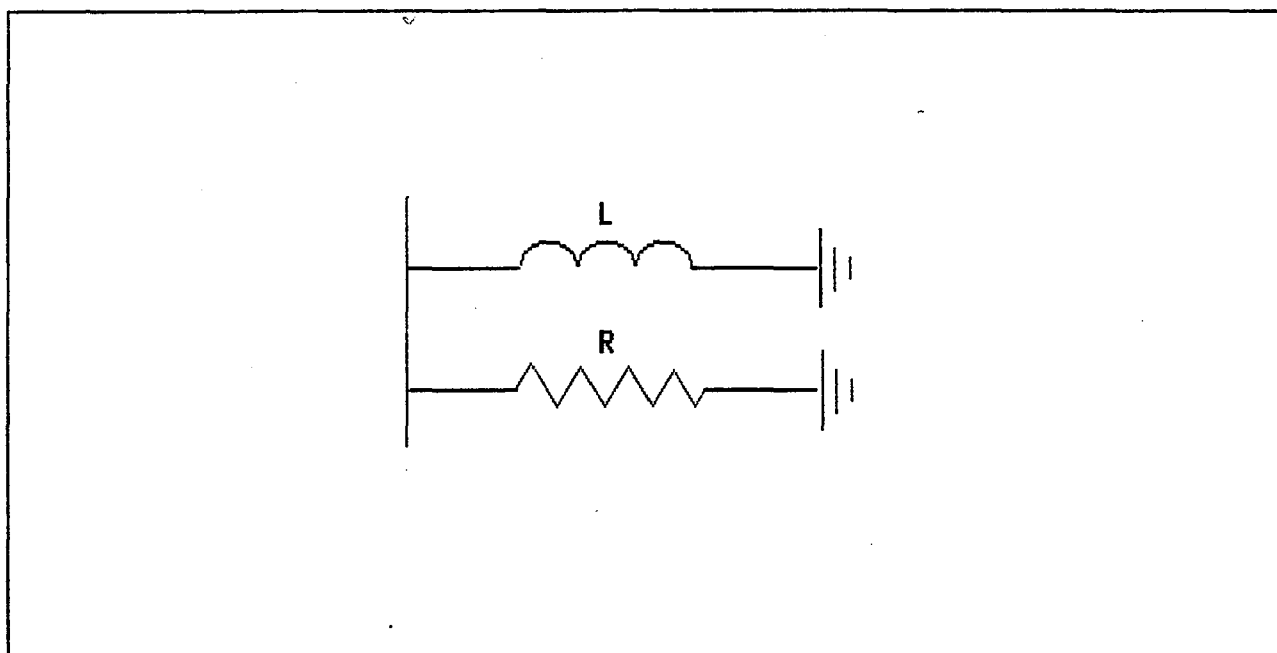


FIGURA 22 - Modelo da Carga da ECS.

QUADRO 13 - Carga Conectada à ECS.

Carga	Potência		R (Ω)	L (mH)	cos ϕ
	(MW)	(MVar)			
máxima	25	8.22	7.61	6.64	0.95
mínima	3	0.99	63.48	5.53	0.95

O comportamento desta carga com a frequência pode ser

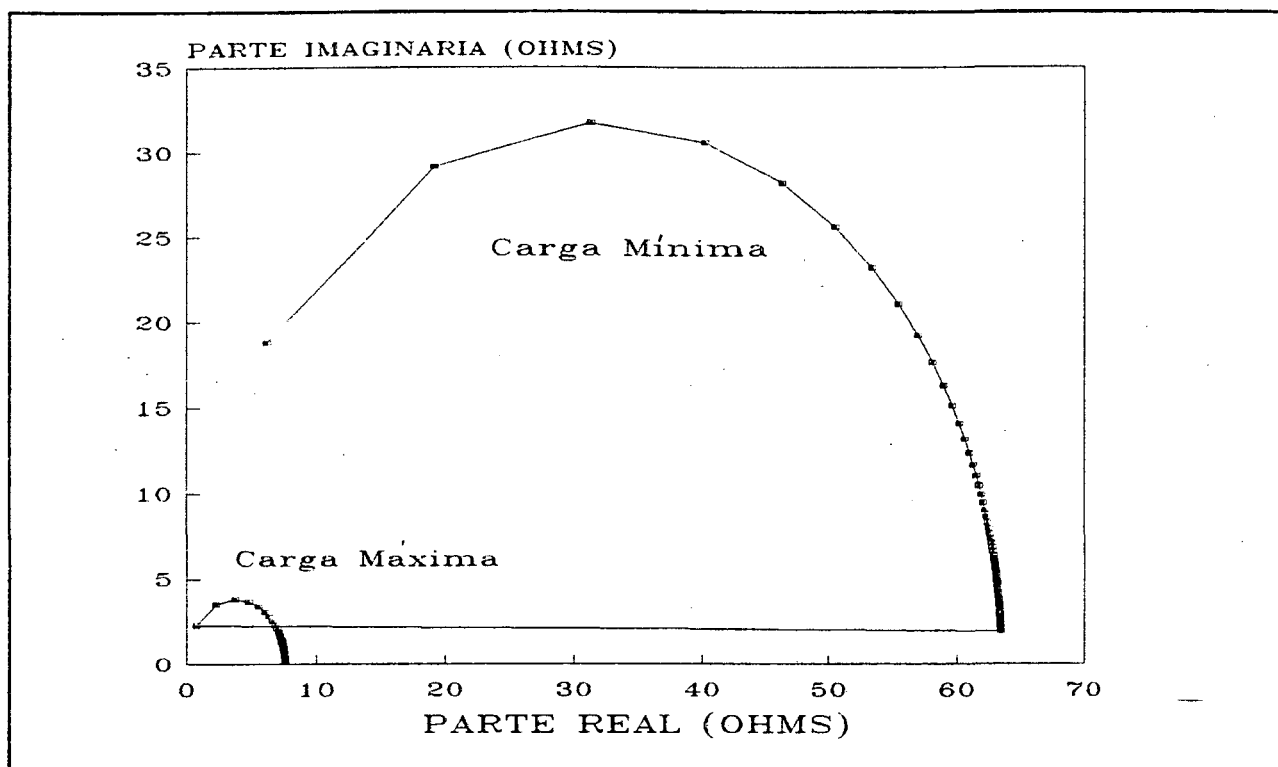


FIGURA 23 - Curva Carga x Freqüência.

visualizado na figura 23. O círculo maior corresponde à condição de carga mínima, ao passo que o menor representa a carga máxima.

A partir da curva $X - R$ constroi-se facilmente o diagrama circular da figura 24, que engloba todos os valores possíveis para a impedância da carga.

Este diagrama é então utilizado na obtenção da combinação entre as impedâncias dos filtros, compensador síncrono e rede, que cause as maiores correntes harmônicas na carga, conforme visto anteriormente neste capítulo.

b) Modelo do Compensador Síncrono:

Para estudos de penetração harmônica as máquinas são representadas apenas por suas reatâncias subtransitórias,

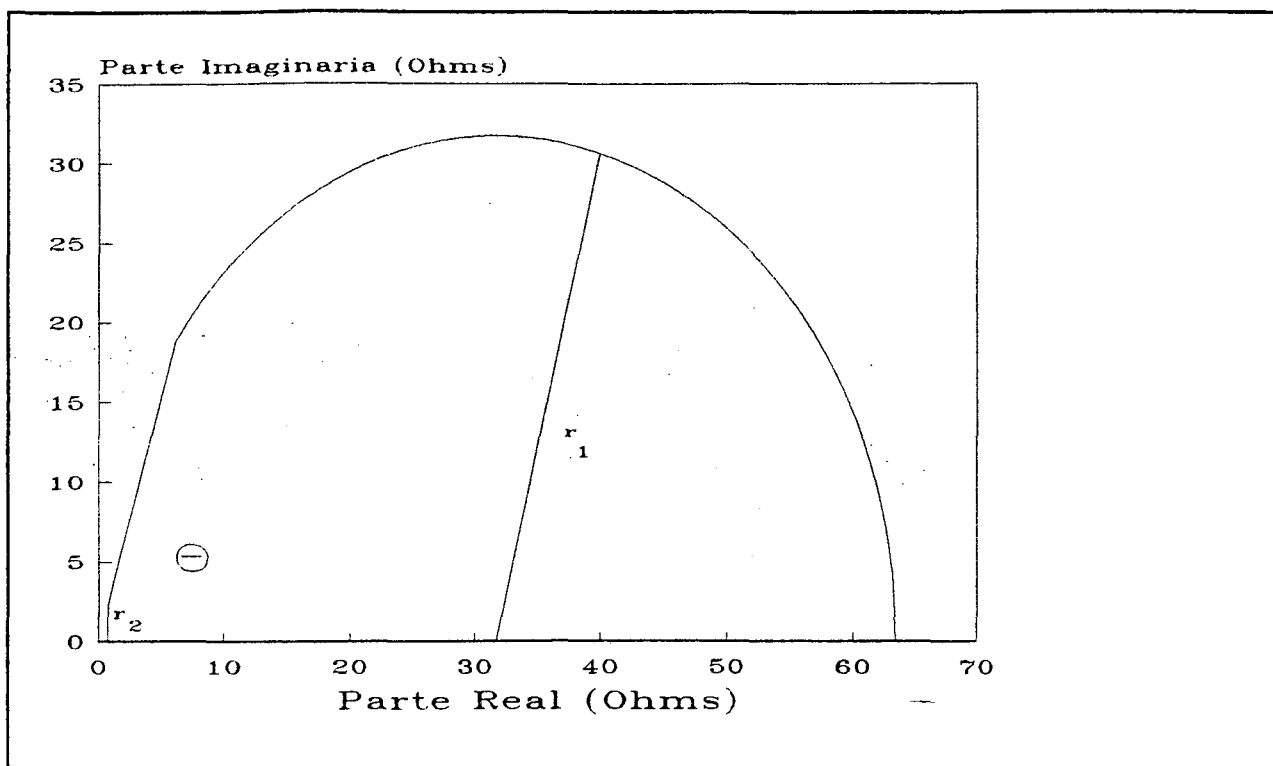


FIGURA 24 - Diagrama Circular. $r_1 = 0,743 \, \Omega$; $r_2 = 31,71 \, \Omega$; $\theta = 71,8^\circ$.

conforme bem esclarece a referência [1]. No quadro 14 estão transcritos os parâmetros do compensador síncrono, obtidos no capítulo 5 deste trabalho.

c) Premissas Básicas e Critérios de Performance Adotados:

Como estão previstos, para a ECS em questão, modos de operação com seis e doze pulsos, o dimensionamento dos filtros deve considerar a presença de harmônicos característicos de seis e doze pulsos, além dos não-característicos.

A configuração adotada para os filtros visou também evitar chaveamentos durante a operação, ou seja, buscou-se um único banco que pudesse ficar conectado permanentemente à ECS. Nas situações em que o banco estiver gerando uma quantidade de reativo superior às necessidades da estação, o excedente

será absorvido pelo compensador síncrono, o qual também suprirá o reativo consumido pelas conversoras que os filtros não tem capacidade de gerar.

QUADRO 14 - Parâmetros do Compensador Síncrono.

Capacidade nominal	25 MVar
Tensão trifásica nominal	13,8 kV
x"d (na base da máquina)	0,20 pu

Os critérios de desempenho dos filtros foram os mesmos utilizados em alguns dos projetos da empresa Asea Brown Boveri, tendo sido portanto fornecidos por este fabricante. O quadro 15 resume os valores admitidos para distorção linear (DLIN), distorção quadrática (DQ) e interferência telefônica (TIF) na barra CA da estação, além da faixa de variação da frequência para a qual os filtros devem mostrar desempenho satisfatório.

QUADRO 15 - Critérios de Desempenho Para Harmônicos CA.

DLIN	$\leq 4\%$
DQ	$\leq 2\%$
TIF	45
frequência	60 Hz \pm %

d) Configuração Final dos Filtros CA:

O banco único de filtros que melhor se adequou às

necessidades do projeto é composto basicamente por ramos de filtros tipo Passa Alta (PA) e Passa Faixa (PF), que totalizam uma potência reativa de 14 MVar, na frequência nominal, suprimindo assim praticamente todas as necessidades de reativo da ECS. Um resumo das características de cada ramo são encontrados no quadro 16.

Como os harmônicos característicos são aqueles que proporcionam as maiores distorções, haja vista que estes são os mais relevantes em magnitude, foram projetados os seguintes ramos para os harmônicos principais no funcionamento em seis pulsos:

- Dois ramos tipo PF sintonizados no 5° e 7° harmônicos, que são os maiores harmônicos característicos de seis pulsos.
- Um ramo tipo PA sintonizado na frequência de 1080 Hz, com o intuito de filtrar os harmônicos de 17° e 19° ordens.

QUADRO 16 - Características dos Filtros CA.

Tipo	f (Hz)	Un (kV)	Qg (MVar)	qf	qi	Cf (μ F)	Lf (mH)	Rf (Ω)
PA	180	13.8	1.0	3	100	12.38	70.16	245.4
PF	300	13.8	1.5	40	150	20.06	14.03	0.485
PF	420	13.8	1.5	40	150	20.05	7.02	0.339
PA	720	13.8	5.0	5	100	69.16	0.74	17.5
PA	1080	13.8	2.0	5	100	27.78	0.81	29.05
PA	1380	13.8	3.0	3	100	41.71	0.33	9.11

U_n - tensão CA nominal.

Q_g - potência reativa gerada na frequência nominal.

q_f - fator de qualidade dos filtros.

q_i - fator de qualidade do indutor.

C_f , R_f , L_f - elementos capacitivo, resistivo e indutivo dos filtros.

Para os harmônicos característicos de doze pulsos foram utilizados os ramos seguintes:

- Um ramo tipo PA sintonizado na frequência de 720 Hz, com o objetivo de filtrar harmônicos de 11^o e 13^o ordens.
- Um ramo tipo PA sintonizado na frequência de 1380 Hz, para os harmônicos de 23^o e 25^o ordens.
- Detectou-se ainda a necessidade de um ramo especial para o terceiro harmônico, devido à existência de uma ressonância, nesta frequência, entre os filtros, a carga e o compensador síncrono. Com isto tem-se adicionalmente:
- Um ramo tipo PA sintonizado no 3^o harmônico, ou seja, 180 Hz.

e) Desempenho Obtido:

Inicialmente somente os ramos sintonizados nas frequências características foram simulados. Os índices de desempenho destes filtros, calculados para configurações de seis e doze pulsos, em uma das condições mais críticas, no caso o ponto "E", são apresentados na quadro 17.

Estes resultados mostram que alguns dos índices calculados não são satisfatórios, como é o caso das distorções lineares e quadráticas, quando somente uma ponte de seis pulsos é representada. A maior contribuição para estes altos valores

provém justamente do quinto harmônico, como pode ser observado na coluna onde são mostradas as distorções individuais (DIND).

**QUADRO 17 - Índices de Desempenho dos Filtros CA.
(Somente Ramos Sintonizados nos Harmônicos Característicos).**

Conf.	PO	f (Hz)	DIND ordem (%)	DLIN (%)	DQ (%)	TIF
6p	E	57	5º 1.5960	5.7286	2.2534	27.67
		63	5º 1.8904	6.1534	2.5217	29.82
12p	E	57	3º 1.2057	4.1083	1.7003	39.47
		63	3º 1.1957	4.0839	1.7022	44.23

(*) Conf.: 6p - configuração com uma ponte de seis pulsos.

12p - configuração com duas pontes de seis pulsos.

(**)PO: ponto de operação da ECS definida no Capítulo 3.

No caso de duas pontes de seis pulsos (operação com doze pulsos), este problema não ocorre posto que, não só os harmônicos de quinta ordem como também os de sétima são naturalmente eliminados, devido às conexões dos enrolamentos dos transformadores. Nesta situação o fator TIF apresenta-se alto, mas sem violar os critérios adotados, e a distorção individual apresenta seu valor máximo para o terceiro harmônico.

Voltando às considerações assumidas quando do dimensionamento do compensador síncrono, no Capítulo 3, foi prevista a existência de uma ressonância próxima ao terceiro harmônico entre este equipamento, representado por sua reatância subtransitória, a rede, modelada exclusivamente pela carga, e os filtros.

A adoção de um filtro do tipo PA de terceiro harmônico evita que as correntes de terceira ordem sejam injetadas na rede. Além disso seu efeito é sentido também na filtragem de harmônicos de ordem superior à terceira, como é o caso do quinto harmônico, na configuração de seis pulsos.

Os resultados alcançados para os pontos de operação "C", "D" e "E", após a inclusão do ramo em questão são apresentados no quadro 18. Com isto o desempenho passa a obedecer os critérios e a distorção de terceira e quinta ordens são minimizadas.

**Quadro 18- Índices de Desempenho dos Fitros CA.
(Ramos Sintonizados nos Harmônicos Característicos e no Terceiro Harmônico).**

Conf.	PO	f (Hz)	DIND ordem (%)		DLIN (%)	DQ (%)	TIF
6p	C	57	5 ^a	1.5398	3.9903	1.7961	15.04
		63	5 ^a	1.7967	4.3861	2.0755	16.48
	D	57	5 ^a	1.5753	4.3505	1.8556	19.55
		63	5 ^a	1.8382	4.7616	2.1437	21.51
	E	57	5 ^a	1.5943	4.8312	1.9137	27.56
		63	5 ^a	1.8604	5.0510	2.2047	29.67
12p	C	57	11 ^a	0.5657	2.3208	0.8812	21.70
		63	3 ^a	0.5479	2.2995	0.8704	23.56
	D	57	11 ^a	0.7384	2.6812	1.0476	29.47
		63	13 ^a	0.6786	2.6754	1.0467	33.17
	E	57	11 ^a	0.8892	3.2281	1.2454	39.32
		63	13 ^a	0.9003	3.2348	1.2610	44.02

(*) Conf.: 6p - configuração com uma ponte de seis pulsos.

12p - configuração com duas pontes de seis pulsos.

(**)PO: ponto de operação da ECS definida no Capítulo 3.

6.4.- Conclusões.

Com relação ao cálculo de harmônicos e à especificação de filtros CA para a estação conversora série, merecem destaque os seguintes aspectos:

- a) O cálculo realista dos harmônicos gerados pela ECS deve considerar a variação linear da reatância de comutação com a posição do LTC, o que pode influenciar significativamente os resultados.
- b) As possíveis configurações da ECS com uma ou duas pontes de seis pulsos exigem a presença de filtros para os harmônicos característicos de seis e doze pulsos. Além disso foi necessário um filtro de 3º harmônico, devido à ressonância existente entre filtros, síncrono e rede.
- c) A potência reativa dos filtros requeridos é de 14 MVAR o que equivale aproximadamente ao consumo máximo de reativo da ECS.
- d) Este total decorre das premissas assumidas, dentre as quais destacam-se a configuração dos filtros, com um único banco para evitar chaveamentos, além dos índices de desempenho adotados.

Os harmônicos de tensão gerados pela ECS e as influências destes harmônicos no sistema de transmissão CCAT serão abordados no próximo capítulo. A questão da filtragem destes harmônicos também será levantada.

7.- Harmônicos e Filtros CC.

7.1.- Introdução.

O processo de conversão CA/CC gera tensões harmônicas, no lado CC da estação, que produzem, a seu turno, correntes harmônicas na linha de transmissão CC. Os campos magnéticos resultantes destas correntes induzem tensões nas linhas telefônicas situadas nas proximidades, ocasionando ruídos indesejáveis. Além disto, harmônicos de baixa ordem, próximos da frequência fundamental, podem excitar ressonâncias no sistema CC.

A abrangência das interferências nas linhas telefônicas depende de vários fatores tais como:

- a intensidade das correntes harmônicas de modo homopolar ao longo da transmissão CC, as quais, por sua vez, dependem de vários outros fatores tais como o modo de operação da transmissão, se bipolar, monopolar com retorno pela terra ou metálico, da magnitude das tensões harmônicas geradas pelas conversoras, parâmetros da linha CC, etc.
- o acoplamento mútuo entre a transmissão CC e os sistemas de telecomunicações mais próximos, que depende das distâncias envolvidas e da susceptibilidade das redes telefônicas.

As conversoras principais de uma transmissão CCAT são normalmente providas de filtros, reatores de alisamento e capacitores nas

barras de neutro, com a função de minimizar as correntes harmônicas e, conseqüentemente, seus efeitos.

Uma estação conversora série, como qualquer outra conversora, também gera harmônicos de tensão. A magnitude destes harmônicos é bem pequena, quando comparada aos harmônicos de tensão gerados pelas conversoras de grande porte. Entretanto, este fato não assegura que as correntes harmônicas ao longo da linha, devidas à ECS, terão efeitos desprezíveis.

O que se pretende, nesta parte do trabalho, é realizar uma investigação dos efeitos dos harmônicos gerados pela ECS em questão, em uma rede CC típica.

Para tal, buscou-se um caso particular, com características bastante adversas, e que possibilitou importantes conclusões a respeito da necessidade ou não de equipamentos para redução das correntes harmônicas na rede CC, devido à ECS.

O conteúdo deste capítulo tem como base teórica as referências [1], [2] e [8], cujas leituras prévias são recomendáveis.

7.2.- Metodologia, Critérios e Premissa.

As investigações se iniciam com o cálculo das tensões harmônicas geradas pela ECS, para o que foi utilizado o modelo de três pulsos, desenvolvido pela empresa Asea Brown Boveri, e apresentado na referência [8].

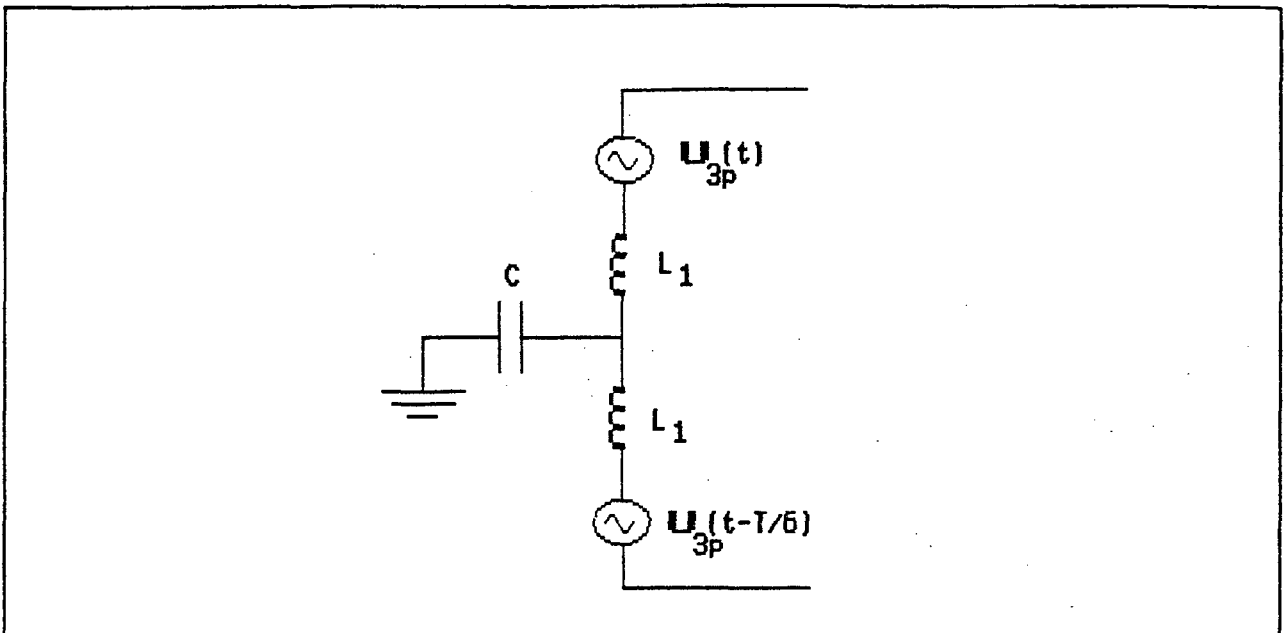


FIGURA 25 - Modelo de um Conversor de 6 Pulsos para Estudo de Harmônicos CC.

Segundo este modelo, mostrado na figura 25, uma conversora de seis pulsos é representada por duas fontes de tensões harmônicas triplas, defasadas entre si de 60° , e que se referem aos dois grupos de comutação de três pulsos que a compõem.

Os demais elementos que formam o modelo são as reatâncias de comutação modificadas, calculadas pela relação que se segue, e a capacitância parasita equivalente, formada principalmente pelas capacitâncias das buchas dos transformadores.

$$L_1 = \epsilon/2 \cdot L_c, \quad (44)$$

onde:

L_c é a reatância de comutação da ponte de seis pulsos.

ϵ é o fator que considera a duração média das comutações,

dado por:

$$\epsilon = 1/2 (1,5 \mu/60 + (60 - \mu)/60) \quad (45)$$

A magnitude destes harmônicos triplos podem ser obtidas diretamente

da decomposição de Fourier aplicada à conhecida forma da tensão de cada grupo de três pulsos, conforme descrito na referência [8].

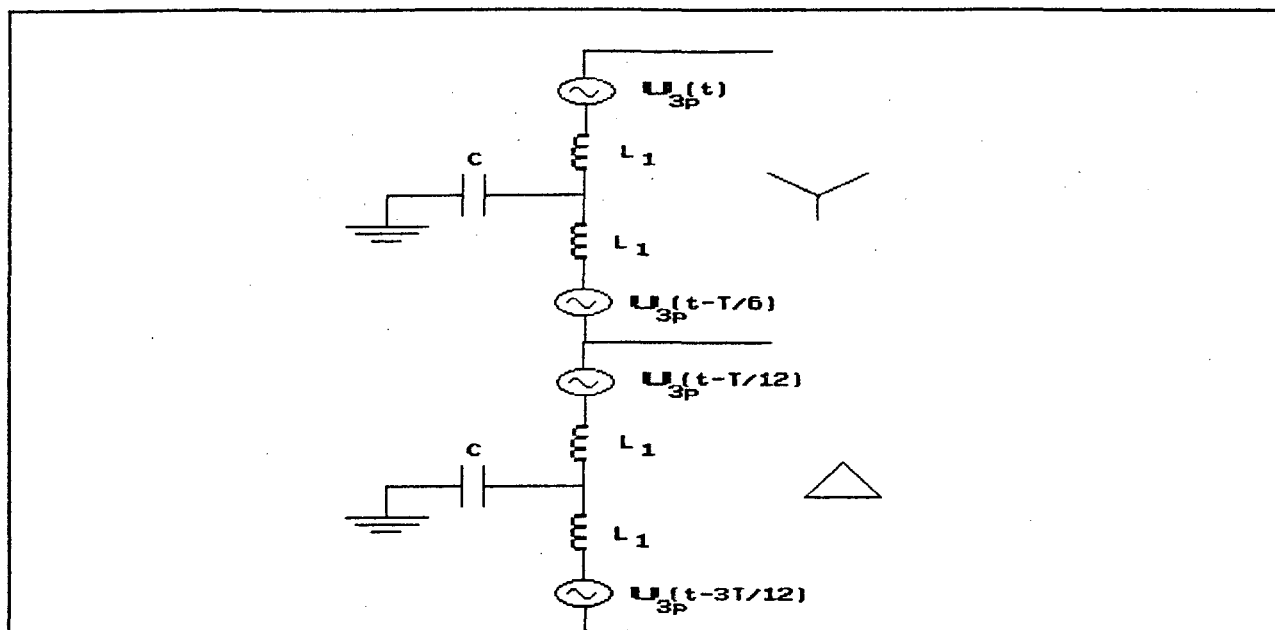


FIGURA 26 - Modelo de um Conversor de 12 Pulsos para Estudos de Harmônicos CC.

No caso de duas conversoras de seis pulsos, o modelo é análogo, conforme ilustra a figura 26, e considera a defasagem de 30° entre os enrolamentos do transformador conversor.

Para o cálculo dos harmônicos de tensão de três pulsos foi utilizado um programa específico de propriedade da empresa Asea Brown Boveri, de nome "HAP".

Esta ferramenta também fornece os harmônicos de tensão não-triplos, e por conseguinte, não-característicos, causados pelos mesmos desbalanços já discutidos no capítulo anterior, que trata dos harmônicos CA.

A estratégia utilizada no estudo dos harmônicos de tensão foi o

levantamento dos maiores componentes de cada ordem, visando formar o conjunto dos harmônicos críticos.

Para tanto foram calculados os harmônicos característicos e não-característicos, correspondentes a diversos pontos em torno da região operativa, definida no capítulo 3, levando em conta somente o modo de operação com duas pontes de doze pulsos. Desta forma, foram obtidas as tensões harmônicas mais críticas para cada uma das fontes do modelo da figura 26.

Para os harmônicos não-característicos adotou-se o critério de considerar apenas aqueles cujo valor rms fosse superior a 10 V, para cada uma das fontes de tensão do modelo. O único harmônico que satisfizesse esta condição foi o de segunda ordem. Por este motivo, os demais harmônicos não-característicos foram desprezados.

Os efeitos das tensões harmônicas geradas pela ECS foram verificados no sistema de transmissão hipotético, cujas características básicas foram apresentadas no capítulo 3.

O circuito estudado é mostrado na figura 27, onde identificam-se a linha CC propriamente dita, as linhas de eletrodo e os eletrodos terra das estações principais, além da ECS operando com duas pontes de seis pulsos.

A forma de operação monopolar com retorno pela terra foi adotada por ser a mais crítica, em termos de possíveis interferências telefônicas, posto que todas as correntes harmônicas são de modo homopolar.

Considerou-se ainda uma outra hipótese, segundo a qual as estações principais são providas de filtros sintonizados nas frequências harmônicas de 12^o, 24^o, 48^o ordens, além de um ramo sintonizado na 2^a harmônica, e um ramo passa-alta com vistas nos harmônicos de maior ordem, a exemplo do que ocorre no sistema de Itaipú.

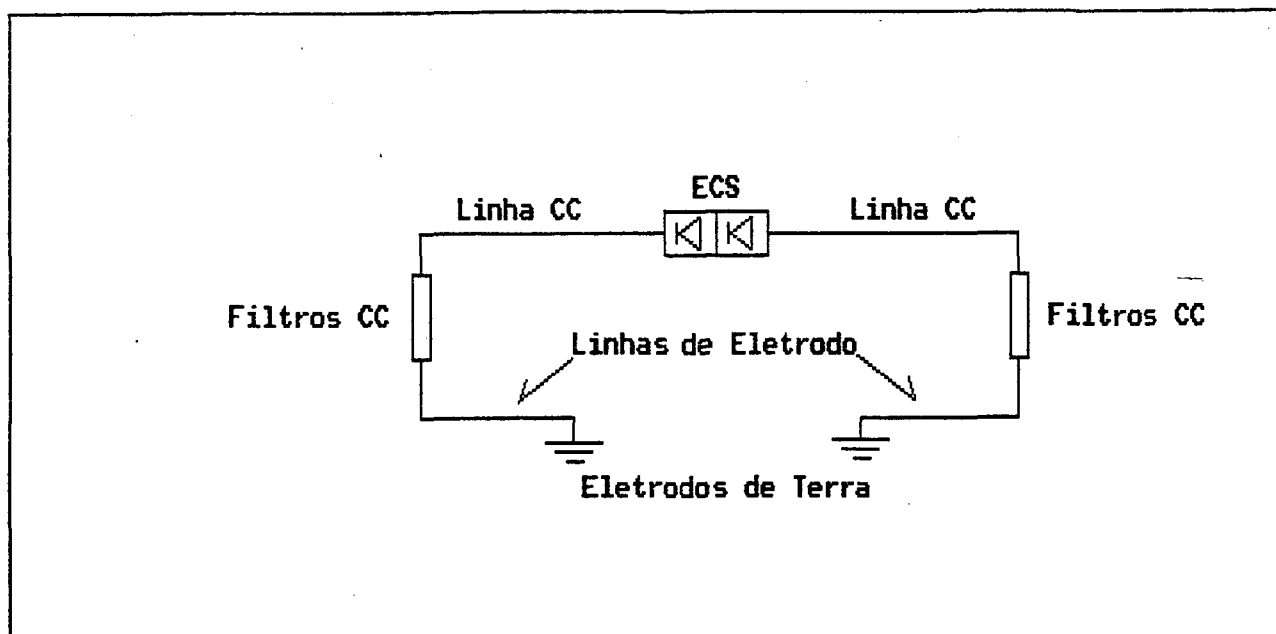


FIGURA 27 - Circuito para Estudo dos Harmônicos CC Gerados pela ECS.

A existência de filtros para os harmônicos característicos mais significativos e para o único harmônico não-característico considerado, além do ramo passa-alta, sugeriu uma simplificação importante, aplicada ao sistema CC estudado, que consistiu em representar tais filtros como efetivos curto-circuitos.

As linhas de transmissão foram representadas por modelos "pi", obtidos a partir dos parâmetros básicos das mesmas. O número de "pi's" adotado foi proporcional ao comprimento das linhas, havendo 1 "pi" para cada 10 km de linha.

Para avaliação dos efeitos de interferência telefônica, provocados pelas correntes harmônicas na rede CC, foi utilizada uma grandeza conhecida como "Corrente Equivalente de Distúrbio", definida segundo a expressão abaixo:

$$I_e = \left(\sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m I_{ij} \cdot C_i \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (46)$$

onde identificam-se:

I_{ij} é a corrente harmônica de ordem "i" que flui pelo condutor "j" da linha CC.

C_i são os fatores de ponderação já apresentados nos estudos de harmônicos CA.

O valor aceitável para a corrente de distúrbio depende de fatores diversos relacionados com a possibilidade de interferências telefônicas, não havendo um número definido que possa ser usado como referência. Há projetos existentes cuja corrente de distúrbio não pode ultrapassar 100mA, enquanto em outros são permitidos valores até 2000 mA.

7.3- Procedimento do Estudo.

De posse dos harmônicos calculados para os diversos pontos de operação, em torno da região operativa, foi obtido um único conjunto de harmônicos críticos, que engloba os maiores valores de cada ordem harmônica.

Foram estudadas diversas situações, nas quais não só o comprimento

da linha como a localização da ECS na mesma, foram variados. Foi ainda verificado o efeito da instalação de reatores de alisamento de diversos valores em série com a ECS. O quadro 19 apresenta a lista de casos estudados.

A posição "A" da ECS refere-se à situação hipotética em que a mesma está localizada exatamente no meio da linha. A posição "B" indica que a ECS divide a linha em dois trechos, sendo o primeiro de 25% e o segundo de 75% do comprimento total, de acordo com o que está ilustrado na figura 28.

QUADRO 19 - Harmônicos CC Lista de Casos Estudados.

Caso	Comprimento da Linha (km)	Posição da ECS	Reator de Alisamento (mH)
1	800	A	-
2	800	A	75
3	800	B	-
4	800	B	75
5	500	A	-
6	500	A	75
7	500	B	-
8	500	B	75
9	500	B	*

* - Reator substituído por uma filtro em paralelo com a ECS.

Finalmente, o caso com os piores resultados, em termos de corrente equivalente de distúrbio, foi escolhido para a verificação do desempenho de uma configuração de filtros CC, ilustrada na figura 29, composta por um ramo único em paralelo com a ECS, sintonizado no 12º harmônico, em substituição ao reator de alisamento.

A escolha do valor do reator de alisamento e o detalhamento dos elementos que compõem o filtro CC são assuntos abordados no item

seguinte que trata exclusivamente dos dados utilizados.

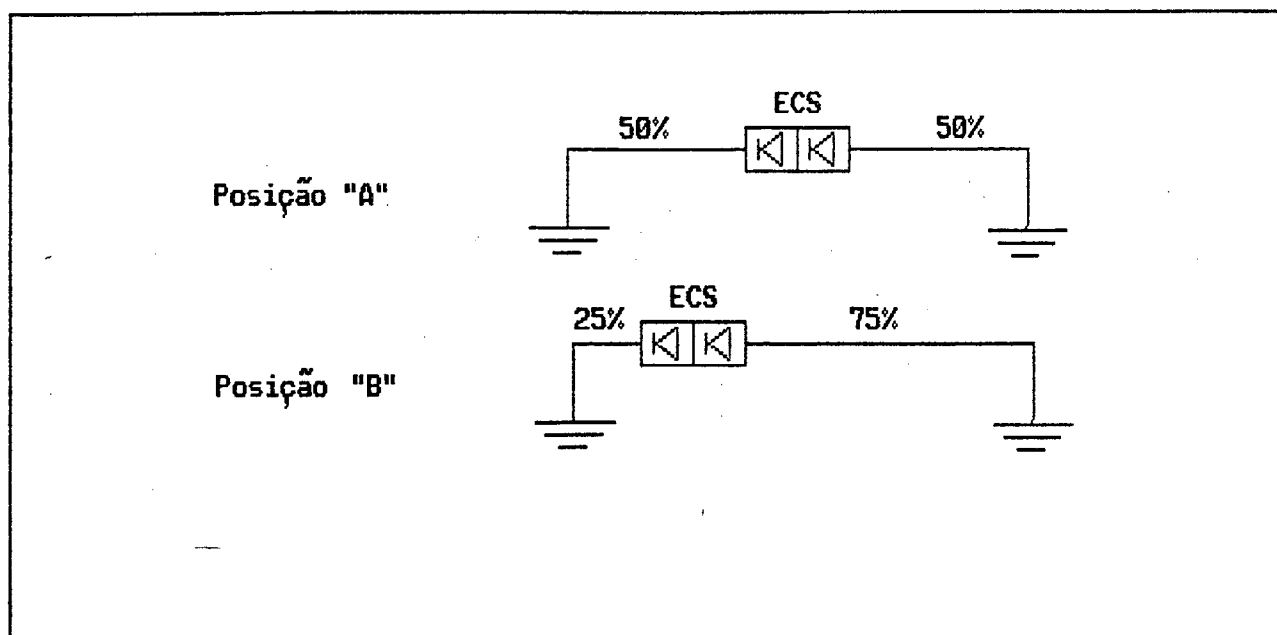


FIGURA 28 - Localizações da ECS.

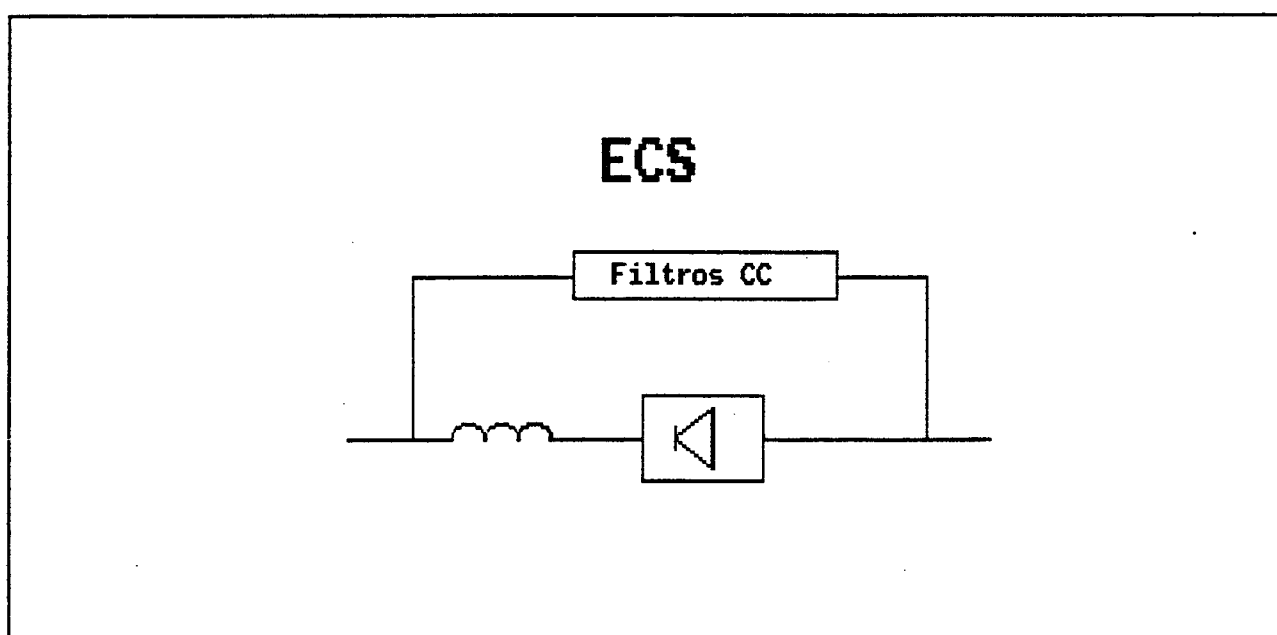


FIGURA 29 - Filtros CC em Paralelo com a ECS.

7.4.- Dados Utilizados.

7.4.1.- Dados para o Cálculo dos Harmônicos de Tensão.

O cálculo dos harmônicos de tensão, característicos (3 pulsos) e não-característicos baseou-se nos parâmetros da ECS definida no capítulo anterior, considerando apenas o modo de operação em doze pulsos. Foram adotados desvios padrão de 0,042 e 0,095 para d_x e ângulo de extinção, respectivamente, na determinação dos harmônicos não-característicos.

Os harmônicos foram calculados para diversos pontos de operação, em torno da região operativa da figura 15 do capítulo 3. As características destes pontos podem ser vistas no quadro 5, daquele mesmo capítulo.

7.4.2.- Dados do Sistema CC.

Todos os dados utilizados foram obtidos do sistema CCAT da Nova Zelândia, que se constitui de um bipolo, com tensão de operação de ± 350 kVCC e corrente nominal de 1500 A.

a) Linha de Transmissão CC :

- | | |
|---|-----------|
| . Número de condutores por pólo: | 3 |
| . Resistividade da terra (Ohm.m): | 1000 |
| . Características do cabo condutor principal: | |
| Tipo: | ACSR 76/7 |
| Diâmetro externo (m): | 0,03840 |

Porção externa (alumínio):

Número de fios :	76
Diâmetro dos fios(m):	0,00373
Resistividade (Ohm.m):	2,910E-08
Permeabilidade Relativa:	1,0
Núcleo :	aço
Diâmetro(m):	0,00868
Número de fios :	7
Diâmetro dos fios(m):	0,00289
Resistividade (Ohm.m):	2,0E-07
Permeabilidade Relativa:	1000

. Características do cabo pára-raio:

Diâmetro externo (m):	0,01105
Número de fios :	7
Diâmetro dos fios(m):	0,00367
Resistividade (Ohm.m):	2,00E-07
Permeabilidade Relativa:	1000

. Geometria da cabeça da torre: ilustrada na figura 30.

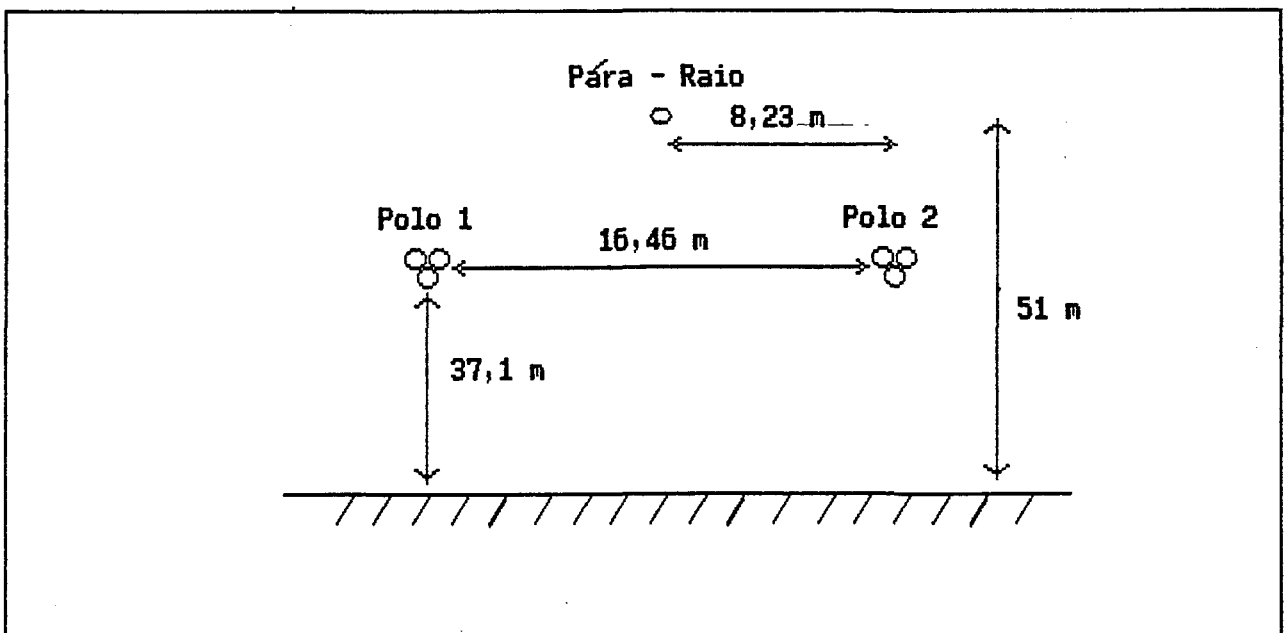


FIGURA 30 - Geometria da Cabeça de Torre da Linha CC.

Para efeitos de simulação, um dos polos da linha foi aterrado, em ambos os extremos. A flecha média utilizada foi de 15.0 m

b) Linhas de Eletrodo:

As linhas de eletrodo possuem cabos com as mesmas características dos utilizados na linha principal dispostos na torre cuja geometria é mostrada na figura 31. O comprimento adotado foi de 20 km para cada uma delas, em rotas supostas distintas da transmissão principal. A flecha média utilizada foi de 8.5 m.

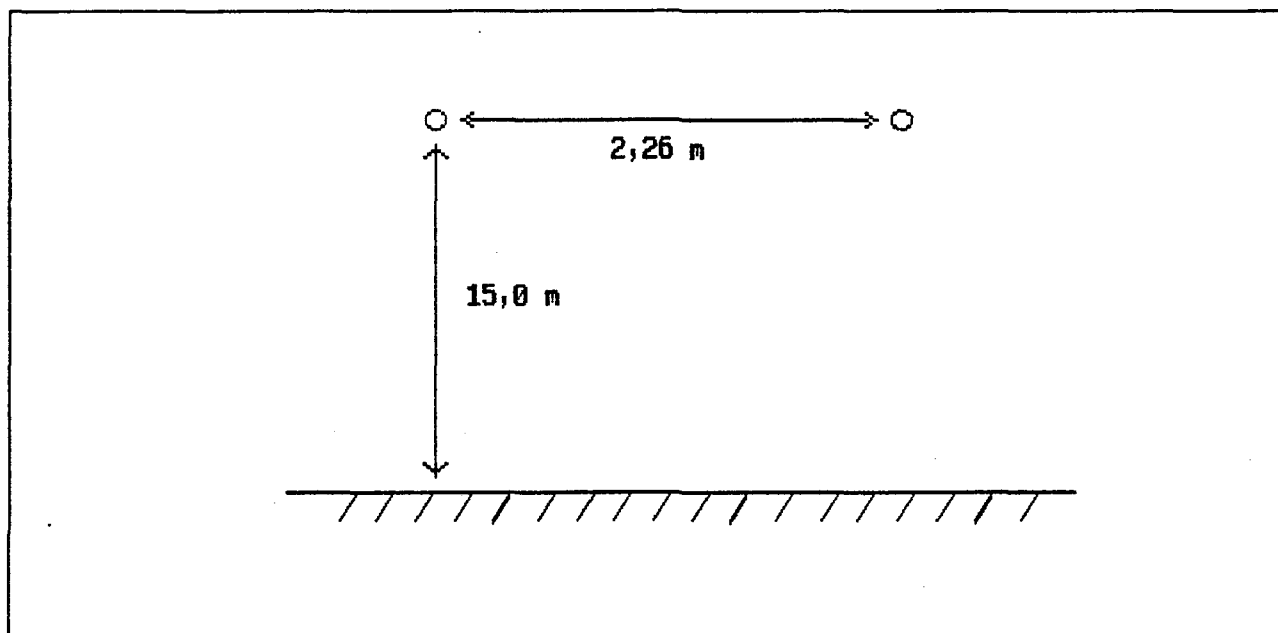


FIGURA 31 - Geometria da Cabeça de Torre da Linha de Eletrodo.

c) Eletrodos de Terra:

O valor utilizado para as resistências de eletrodo foi de $110 \text{ m}\Omega$, em cada terminal.

d) Modelo da ECS:

A ECS foi modelada por 4 fontes de harmônicos, de acordo com a figura 26.

O valor das indutâncias, para cada ponte de seis pulsos, foi obtido a partir do valor nominal da reatância de comutação (X_c), através das relações seguintes:

$$X_c = U_{dion} / I_{dn} \cdot d_{xn} \quad (\Omega) \quad (47)$$

$$L_c = X_c / (120 \cdot \pi) \quad (H) \quad (48)$$

De posse de X_c , calculado pelas relações acima, e do fator ϵ cujo valor adotado foi 0,950, obtem-se L_i igual a 0,543 mH, diretamente da relação (44).

Para a capacitância de parasita, foi tomado um valor típico, com base nas medições efetuadas nos transformadores conversores das estações do sistema CCAT da Nova Zelândia. Um valor de capacitância como este deve ser esperado para a ECS, posto que as buchas dos transformadores, neste caso, devem prover isolamento para a tensão nominal de operação, da mesma forma que os transformadores das estações principais. Desta forma chegou-se a $C_i = 10$ nF.

e) Equipamentos de Filtragem e Atenuação de Harmônicos:

Para o reator de isolamento, utilizado em alguns casos simulados, foi arbitrado 75 mH, ou seja, a metade do valor dos reatores das estações principais do sistema tomado como referência.

O único filtro usado no estudo foi um ramo do tipo PF, sintonizado para o 12º harmônico, em paralelo com a ECS, conforme mostra a figura 30, visando uma solução de menor custo. Suas características são:

$$R_f = 1 \, \Omega$$

$$L_f = 4.4 \, \text{mH}$$

$$C_f = 11.1 \, \mu\text{F}$$

$$q_f = 20$$

7.5.- Resultados Obtidos.

7.5.1.- Harmônicos de Tensão.

Os harmônicos de tensão obtidos estão agrupados no quadro 20. Cada uma das colunas representa um dos geradores de três pulsos da figura 26.

7.5.2.- Apresentação e Análise dos Casos Simulados.

A lista de casos simulados já foi apresentada no item 7.3, que trata dos procedimentos. Para cada caso foi calculada a corrente equivalente de distúrbio (I_e), ao longo da linha de transmissão. Os resultados são mostrados em forma de gráficos no apêndice C, sendo que dois gráficos foram construídos para cada uma das situações simuladas. O primeiro mostra I_e ao longo da linha e o segundo os componentes harmônicos de I_e com maior peso.

QUADRO 20 - Harmônicos de Tensão Calculados (Volts).

**	Y - Sup.		Y - Inf.		D - Sup.		D - Inf.	
	Mod.	Ang.	Mod.	Ang.	Mod.	Ang.	Mod.	Ang.
2	90,0	0,0	90,0	0,0	90,0	0,0	90,0	0,0
3	1595,8	20,9	1593,5	-159,0	1593,5	111,0	1593,5	-69,0
6	590,9	18,5	586,2	18,7	586,2	-161,3	586,2	-161,3
9	376,7	-101,5	377,2	78,1	377,2	168,1	377,2	-11,9
12	278,5	-170,6	278,5	-170,6	278,5	-170,6	278,5	-170,6
15	219,2	119,5	220,4	-59,9	220,4	-149,9	220,4	30,0
18	185,2	51,0	182,1	52,2	182,1	-127,7	182,1	-127,8
21	156,9	-15,06	154,5	164,7	154,5	-105,3	154,5	74,7
24	147,8	-74,98	147,8	-75,0	147,8	-75,0	147,8	-75,0
27	147,0	-72,02	146,2	107,0	146,2	17,0	146,2	-162,9
30	131,2	-112,7	133,2	-114,7	133,2	65,3	133,2	65,3
33	116,3	-170,0	118,8	9,8	118,8	99,8	118,8	-80,2
36	107,1	133,0	107,1	133,0	107,1	133,0	107,1	133,0
39	93,1	91,2	93,2	-87,3	93,2	182,7	93,2	2,7
42	78,1	49,8	75,0	52,7	75,0	-127,3	75,0	-127,3
45	69,8	5,1	67,3	185,3	67,3	-84,7	67,3	95,3
48	61,6	-113,6	61,6	-113,6	61,6	-113,6	61,6	-113,6
51	69,1	75,7	69,1	-104,3	69,1	165,7	69,1	-14,3

** - ordem do harmônico.

Observando o caso 1 do apêndice C, que corresponde à situação em que a ECS está localizada na posição "A" da linha de 800 km, verifica-se que o valor de I_0 é bastante elevado, atingindo 2600 mA nas proximidades das estações terminais. O componente harmônico de maior peso é o 12º, responsável por quase todo o valor calculado para I_0 .

Como pode ser notado no caso 2 daquele mesmo apêndice, a inclusão de um reator de alisamento de 75 mH reduz a corrente de distúrbio máxima para 800 mA.

No casos 3 e 4, a ECS foi deslocada para a posição "B", ou seja, para mais próximo de um dos terminais. Com isto, a simetria da distribuição de I_0 foi perdida, além do que valores distintos para

esta corrente, em relação aos casos 1 e 2, foram obtidos.

Os casos de número 5 e 6 correspondem às mesmas condições dos casos 1 e 2 respectivamente, supondo, entretanto, que a linha tenha 500 km de comprimento. Observa-se que o reator de alisamento reduz I_d de 1400 mA para 1100 mA e que os valores máximos da corrente de distúrbio ocorrem exatamente nas extremidades da linha.

O deslocamento da ECS para a posição "B" da linha de 500 km provoca um efeito bastante interessante, elevando a corrente de distúrbio máxima para 2300 mA, como pode ser visto nos gráficos referentes ao caso 7.

Os resultados da inclusão do reator de alisamento no sistema com as características do caso anterior devem ser analisados cuidadosamente, posto que, como pode ser observado nos gráficos do caso 8, houve um acréscimo substancial na corrente de distúrbio, alcançando-se o valor de 4800mA.

Conclui-se que o reator em questão provocou uma ressonância com o restante do sistema o que, em última estância, elevou razoavelmente a contribuição da 12ª harmônica para a corrente equivalente de distúrbio.

Finalmente, o último caso analisado refere-se à substituição do reator de alisamento pelo filtro cuja configuração foi anteriormente apresentada. Os resultados apresentados no caso 9 mostram que esta medida é bastante efetiva, com I_d atingindo o valor máximo de 64mA.

A configuração de filtros escolhida é a de menor custo pois os filtros estarão submetidos à tensão operativa da ECS que, no caso, não ultrapassa 25 kV. Entretanto, existe um inconveniente que precisa ser considerado. O filtro instalado representa um curto-circuito para as frequências sintonizadas, no caso em questão a 12'. Com isto há uma elevação dos esforços térmicos nas válvulas, que precisam ser limitados, o que poderia ser feito através de um reator em série com a ECS, conforme ilustra a figura 29.

Como pode ser notado, este reator precisaria ser dimensionado para a corrente do sistema principal, por ser um elemento série, o que implicaria em elevação de custo. Todavia seu tamanho seria bem menor que os reatores de alisamento das estações principais, se for considerado que tanto as válvulas das estações principais como as da ECS possuem as mesmas características de suportabilidade térmica.

7.6.- Conclusões.

Da análise realizada extraem-se os seguintes tópicos relevantes:

a) As tensões harmônicas geradas por uma ECS, apesar de serem de pequena amplitude quando comparadas com a tensão de transmissão principal, podem produzir interferências telefônicas indesejadas.

b) A magnitude destas interferências dependerá de diversos fatores tais como os parâmetros do circuito principal, a posição da ECS no mesmo, os modos de operação previstos,

além da configuração de filtros das estações principais.

c) Os efeitos de interferência telefônica são maximizados no modo de operação monopolar com retorno pela terra. Nas configurações bipolar ou monopolar com retorno metálico a corrente equivalente de distúrbio é sensivelmente reduzida.

d) O uso de reatores de alisamento em série com a ECS não se mostrou uma boa solução para a redução da corrente equivalente de distúrbio. Houve casos em que os referidos reatores amplificaram a corrente de distúrbio, devido a ressonâncias entre este equipamento e as linhas CC.

e) No caso em que a proximidade de linhas telefônicas exigirem, a forma mais efetiva e de menor custo para a mitigação de interferências é a instalação de filtros em paralelo com a ECS.

No capítulo que se segue será tratada a importante questão dos custos envolvidos na implementação da ECS em estudo. Será feita, também, uma comparação com outra alternativa de suprimento da pequena carga intermediária.

8.- Análise Econômica da ECS.

8.1.- Introdução.

Os resultados obtidos até este ponto do trabalho mostram que a ECS de comutação natural é tecnicamente viável para drenagem de pequenas potências. Entretanto a aplicabilidade desta tecnologia só pode ser determinada após uma análise econômica que englobe os custos da ECS, além de comparações com outras alternativas de suprimento da carga.

Uma análise econômica da ECS dimensionada nos capítulos anteriores será apresentada a seguir. Os principais tópicos componentes são:

- Análise dos valores nominais dos equipamentos, obtidos nos capítulos anteriores, e das respectivas influências nos custos da ECS.
- Identificação de equipamentos de interface ainda indefinidos, necessários à ECS, tais como a plataforma de isolamento.
- Estabelecimento de uma base de custos que considere as particularidades inerentes ao funcionamento da ECS.
- Avaliação tanto técnica como econômica de uma outra opção de suprimento à carga em questão.

8.2.- Itens Relevantes nos Custos da ECS.

A localização da ECS, em série com uma linha CC de alta tensão implica em equipamentos com níveis de isolamento incomuns ao suprimento de pequenas cargas.

O isolamento válvulas/terra deve ser igual ao da linha. Portanto, uma plataforma similar à utilizada em compensações série deve ser utilizada.

Entre a alta tensão e o barramento da carga, em baixa tensão, existem os transformadores conversores. O isolamento para a terra destes equipamentos deve ser compatível com a transmissão principal, ainda que as tensões de seus equipamentos sejam pequenas, de acordo com as necessidades da carga.

As considerações acima apontam alguns aspectos que podem causar impactos aos custos. São eles:

- Os transformadores conversores, cujas tensões dos enrolamentos são de dezenas de quilovolts, tem que ser isolados para centenas de quilovolts. Assim sendo, o custo destes equipamentos é função preponderante do isolamento, muito mais que de seus valores nominais de potência. A reatância especificada pode solicitar material magnético adicional, o que não chega a ser tão relevante quanto o isolamento.

- As válvulas tem a mesma capacidade de corrente dos conversores principais do elo CC e devem ser,

preferencialmente, refrigeradas a ar, em função de sua colocação sobre a plataforma de isolamento. A utilização de água como fluido arrefecedor poderia criar dificuldades tais como o aumento de peso na plataforma, ou maiores requisitos de isolamento para os dutos de água que vão à plataforma.

- Os sistemas de controle, proteção e disparo terão preços específicos que requerem especial atenção. Os requisitos de controle não decaem proporcionalmente com a potência da conversora.

8.3.- Base de Custos.

As considerações feitas até aqui permitem a montagem de uma estrutura de preços mais realista. É importante enfatizar que a ECS não é um equipamento comum, que já tenha consagrada experiência operacional. Assim, para estimar seus custos o melhor é considerar cada equipamento de forma individual, adicionando sobrecustos devidos a eventuais desenvolvimentos tecnológicos ainda necessários.

Os preços dos equipamentos tradicionais, tais como transformadores, compensador síncrono, conexões de barra, etc, foram retirados da referência [9] publicada pela ELETROBRAS. É importante ressaltar a necessidade de verificar não somente os nominais, mas também os níveis de isolamento, já que estes podem ser determinantes.

Para a ECS em estudo, o preço adotado para os transformadores de 750.000,00 US\$ por unidade corresponde, na referência [9], a um

transformador trifásico de 500/13,8 kV, devido às necessidades de isolamento já explicadas. Adicionou-se ainda 220.000,00 US\$ por transformador, para incluir o LTC de trinta posições, a ser instalado nos enrolamentos de carga.

Para as válvulas, controles e filtros CA adotou-se, como base de custos, dados levantados junto a fabricantes, para uma conversora de 400 kV - 500 MW, pertencente a um estudo interno de planejamento realizado na ELETRONORTE.

O preço das válvulas e filtros foram considerados proporcionais à potência da conversora. Este decaimento linear não pode ser adotado para os equipamentos de proteção e controle. Os custos de controle foram avaliados em 25% dos fornecidos para a conversora de 400 kV.

A área estimada da plataforma foi de 50 m², suficiente para comportar as válvulas, filtros e demais equipamentos. O preço adotado para a mesma foi obtido de uma compensação série típica de 500 kV, planejada para o sistema Norte/Nordeste, da ELETRONORTE.

O quadro 21 resume os custos da ECS. Foram considerados dois compensadores síncronos, por motivos de confiabilidade. Os demais componentes e as obras civis foram incluídos em um só item.

8.4.- Comparação de Alternativas.

Para avaliar a atratividade da aplicação da ECS é interessante

custear uma outra provável alternativa de suprimento da carga em foco. Na região Norte do Brasil, pequenas cargas são normalmente supridas por geradores diesel.

QUADRO 21 - Avaliação de Preços da ECS.

Descrição do Item	Preço (*)
Transformadores Conversores (dois)	1.940,00
Válvulas, Controles e Proteções	3.000,00
Filtros CA	70,00
Compensadores Síncronos (dois)	3.000,00
Plataforma	50,00
Demais Componentes e Obras Civis	500,00
Total:	8.560,00

(*) US\$ x 10³

A evolução da carga a ser suprida é apresentada no quadro 2, do capítulo 3. De acordo com esta evolução foi elaborado um programa de expansão térmica, modulado em unidades de 1,5 MW, a um custo de geração de 84,6 US\$/MWh, que inclui despesas operacionais e de manutenção. Os investimentos em equipamentos foram custeados a parte.

Para a alternativa de suprimento via ECS é necessário ainda custear a energia fornecida. Nesse caso, duas situações foram vislumbradas. A primeira delas pressupõe que a ECS é instalada em um sistema hidro-térmico. Aqui o custo da energia passa a ser equivalente ao custo das perdas de transmissão, que correspondem ao preço da

geração mais cara do sistema, ou 62,4 US\$/MWh. Na segunda situação a ECS é instalada num sistema puramente hidráulico, o que reduz o custo da energia para 34 US\$/MWh.

Todos os custos levantados, transformados em valores referentes ao primeiro ano do projeto, foram agrupados no quadro 23. Esses resultados mostram que a ECS tem vantagens sobre a geração local, para o montante da carga considerada (25MW).

QUADRO 23 - Comparação Econômica.

Alternativa	Valor Presente			%
	Investimento	Energia	Total	
Geração Diesel	2940	54754	57694	118
ECS (1)	8560	40386	48946	100
ECS (2)	8560	22005	30565	62

(*) - US\$ x 10³

(1) - Sistema Hidro-Térmica.

(2) - Sistema Hídrico.

É claro que o resultado acima não pode ser generalizado pois depende das condições de contorno que cada situação impõe. Deve-se esclarecer, entretanto, que o caso estudado é bastante típico na região amazônica.

Observando ainda o quadro 23, nota-se que a parcela preponderante no custo final cabe à energia suprida. Para cargas menores que a estudada, a redução dos valores de energia suprida podem ser tais que a geração térmica local passe a ser mais atrativa do que a instalação de uma ECS num sistema hidro-térmico.

Contribui ainda para esta inversão de posições o próprio custo de

investimento da ECS, posto que este não deve sofrer reduções significativas no suprimento de cargas menores.

Os gastos com energia em sistemas puramente hidráulicos fazem da ECS uma alternativa bem mais atrativa que a geração diesel local.

8.5.- Conclusões.

A análise econômica realizada neste capítulo mostra que:

a) Os fatores preponderantes nos custos da ECS são os transformadores conversores, devido ao isolamento requerido, as válvulas e o compensador síncrono, que precisa ser duplicado por razões de confiabilidade.

b) A ECS apresenta vantagens sobre a geração térmica local, para o montante de carga considerado. Esta afirmativa não é genérica e depende das condições de cada caso. Cabe ressaltar que a situação estudada é bastante típica na região amazônica.

c) Para cargas menores que a considerada, a geração local pode se tornar mais atrativa que a ECS, no caso desta ser instalada em sistemas hidro-térmicos.

d) O custo da energia em sistemas puramente hidráulicos fazem da ECS a alternativa mais atrativa dentre as estudadas.

O capítulo seguinte foi dedicado ao encerramento deste trabalho. Nele são revistas as principais conclusões e traçadas algumas sugestões para futuros desenvolvimentos na área de suprimento de pequenas cargas, a partir de elos de corrente contínua.

9.- Conclusões Finais e Sugestões para Futuros Trabalhos.

9.1.- Conclusões Finais.

Os elos CCAT ponto-a-ponto e multiterminais são alternativas de CCAT que devem ser consideradas no planejamento de sistemas de transmissão, principalmente quando estão envolvidos grandes blocos de energia e longas distâncias.

Dentro deste contexto surge a questão da viabilidade técnica e econômica do suprimento de pequenas cargas no percurso da linha. Esta é, por exemplo, uma situação típica da região Norte do Brasil, onde os aproveitamentos de energia, sejam hidráulicos ou de gás natural, situam-se a uma grande distância dos centros de carga predominantes.

Com isto, os sistemas de transmissão associados aos referidos aproveitamentos seguem, preferencialmente, as rodovias existentes, cruzando pequenas cidades e vilas que, em muitos casos, não dispõem de energia elétrica.

Algumas investigações realizadas nesta área apontaram as estações conversoras série como a forma mais adequada de suprimento a pequenas cargas, a partir de linhas CCAT.

Na busca de uma resposta que pudesse orientar os estudos de planejamento que contemplam alternativas de corrente contínua, o presente trabalho apresentou uma metodologia para o dimensionamento e custeio de uma estação conversora série de comutação natural.

Os parâmetros básicos da ECS tais como correntes, tensões CA e CC, potências nominais e máximas, ângulo de extinção, consumo de reativo, faixa dos comutadores e valores nominais dos transformadores conversores, são determinados, de uma forma simples e rápida, com o método apresentado, considerando todos os aspectos práticos e limitações envolvidas.

A aplicação da metodologia em um caso prático mostrou a viabilidade técnica das ECS de comutação natural. A especificação adicional de filtros CA e do compensador síncrono permitiu ainda uma comparação econômica realista, com outra forma de atendimento à carga intermediária.

O custo das ECS de comutação natural pode reduzir a atratividade desta alternativa, e dois fatores contribuem predominantemente para tal. O primeiro deles é o compensador síncrono, um equipamento caro e que necessita de redundância devido às manutenções periódicas a que deve ser submetido. Daí a necessidade premente de otimização das dimensões do síncrono e conseqüente redução de seu peso no custo total da instalação.

O segundo fator a ser considerado são os comutadores sob carga dos transformadores conversores. Dependendo do comportamento da carga a ser suprida e da corrente no elo principal, estes podem exigir faixas abrangentes, de forma a controlar a tensão CC e a potência drenada pela estação.

Funções de controle especiais poderiam reduzir a faixa dos comutadores. Para configurações com duas pontes de seis pulsos a

operação de uma delas em modo retificador, quando necessário, poderia trazer um grande versatilidade para a ECS e até mesmo a eliminação do LTC. Esta proposta, suas implicações e as mencionadas funções de controle especiais precisariam, entretanto, de definições detalhadas, estudos e simulações.

9.2.- Sugestões para Futuros Trabalhos.

O bom desempenho técnico das ECS de comutação natural é inquestionável, uma vez que a tecnologia envolvida é basicamente a mesma das conversoras de corrente contínua convencionais. A questão dos custos, já abordada no presente capítulo é novamente chamada à tona para guiar as futuras investigações nesta matéria.

A eliminação dos compensadores síncronos só será conseguida através de conversoras de comutação forçada, conforme abordado no capítulo 3. Algumas propostas existentes na bibliografia especializada poderiam ser aplicadas com este fim, sem apresentar, entretanto, o desempenho técnico da comutação natural.

Espera-se que o desenvolvimento de válvulas a GTO ou dispositivo semelhante, possam trazer um grande impulso à tecnologia CCAT como um todo e resolver o problema das pequenas cargas, possibilitando a alimentação de sistemas com baixa, ou mesmo nenhuma potência de curto-circuito.

Como propostas para novos trabalhos surgem naturalmente os seguintes tópicos a serem estudados:

a) ECS de comutação natural:

- . Otimização das dimensões dos compensadores síncronos.
- . Funções de controle especiais que possam reduzir as faixas dos comutadores sob carga, incluindo simulações dinâmicas.

b) ECS de comutação Forçada:

- .Investigação da adequação dos esquemas já propostos, através de simulações e protótipos
- .Proposição de novos esquemas.

10.- Referências.

- [1] - Kimbark E.W.

DIRECT CURRENT TRANSMISSION - Vol.1

John Wiley & Sons

New York - 1971

- [2] - Ekstrom A.

HIGH POWER ELECTRONICS - HVDC and SVC

The Royal Institute of Technology

Stockholm - 1989

- [3] - Napoli R., Piglione F., Tellini A. and Zini G.

SOME SERIES DEVICES FOR SMALL POWER TAPPING FROM
HVDC TRANSMISSION SYSTEMS

Cigré - Updea Symposium

Dakar - 1985

- [4] - Carpaneto E., Piglione L., Testi G., Paris L.,

Giglioli R. and Tietz P.

SMALL POWER TAPPING FROM HVDC TRANSMISSION SYSTEMS

Cigré Session - Paris 1986

- [5] - Bowles J., Nakra H., Turner A.

A SMALL SERIES TAP ON AN HVDC LINE

IEEE - PAS, VOL. 100, No. 2

February 1981

[6] - Stigant A. and Franklin A.C.

THE JSP TRANSFORMER BOOK

Butterworth & Co. Publishers Ltd.

London - 1973

[7] - Ponte J.R.

PRELIMINARY CALCULATIONS FOR A SMALL SCS

Asea Brown Boveri - Internal Report - LAB045/89

Ludvika - 1989

[8] - Shore N.L., Andersson G., Canelhas A.P., Asplund G.

A THREE PULSE MODEL OF DC SIDE HARMONIC FLOW IN HVDC
SYSTEMS.

IEEE/PAS - Summer Meeting - 1988.

[9] - ELETROBRAS

CUSTOS MODULARES de LINHAS e SUBESTAÇÕES.

Rio de Janeiro - 1989.

Apêndice A.

Equacionamento Básico de uma Conversora CA/CC de Comutação Natural.

A.1.- Introdução.

O conteúdo deste apêndice é uma apresentação sumária do equacionamento, em regime permanente, de uma conversora CA/CC de seis pulsos, operando como inversor, visando simplesmente a padronização das grandezas físicas envolvidas no processo de conversão, bem como das relações entre estas. Uma abordagem mais detalhada pode ser encontrada nas referências [1] e [2], e no apêndice D. O equacionamento a ser apresentado considera as seguintes hipóteses básicas:

.As tensões CA que alimentam a ponte são puramente senoidais e simétricas.

.Os transformadores conversores são representados exclusivamente por suas reatâncias de dispersão, com mesma magnitude nas tres fases. As perdas não são consideradas.

.As válvulas de tiristores são ideais, isto é, sem perdas.

.Os pulsos de disparo das válvulas são equidistantes.

Assume-se, ainda, que o ângulo de comutação da corrente entre as válvulas é menor que 60° , nas pontes de seis pulsos, e menor que

30°, nas pontes de doze pulsos. Garante-se assim que o número máximo de válvulas em condução é três, sem o que a formulação que se segue não é válida.

A.2.- Equações da Conversora.

O índice subscrito "n" indica valores nominais.

A tensão CC de um conversor inversor de seis pulsos é dada pelas seguintes relações:

$$U_d = U_{dio} \frac{\cos \tau + \cos(\tau + \mu)}{2} \quad (a.1)$$

$$U_d = U_{dio} \cdot \cos \tau - d_x \frac{I_d}{I_{dn}} \cdot \frac{U_{dion}}{U_{dio}}, \quad (a.2)$$

onde:

I_d é a corrente CC, em kA.

τ e μ são os ângulos de extinção e comutação respectivamente.

A tensão CC ideal a vazio é dada por:

$$U_{dio} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_n, \quad (a.3)$$

onde U_h é o valor rms da tensão CA do transformador conversor, no enrolamento ligado às válvulas, em kV.

A queda de tensão indutiva relativa, d_x , é, em última estância, uma outra forma de apresentação da reatância de comutação, fornecida pela expressão abaixo:

$$d_x = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{I_d \cdot X_t}{U_{dio}}, \quad (a.4)$$

onde x_t é a reatância por fase do transformador conversor, em Ω .

A relação entre as tensões dos enrolamentos primário, ligado à barra CA da estação, e secundário, ligado às válvulas, do transformador conversor é obtido pela seguinte relação:

$$T_h = \frac{U_h}{U_{hn}} \cdot \frac{U_{dion}}{U_{dio}}, \quad (a.5)$$

onde U_h é a tensão CA do enrolamento primário, em kV.

A posição do LTC, que corresponde à relação de transformação acima, pode ser calculada da seguinte forma:

$$\text{Tap} = \frac{\text{Int} (T_h - 1)}{\text{STEP}} \quad (a.6)$$

onde:

Step é a variação percentual da relação de transformação entre duas posições consecutivas do LTC.

Int é uma função simbólica que considera apenas a parte inteira do argumento entre parêntesis.

O ângulo de comutação e o fator de potência da conversora pode ser determinado através das seguintes equações:

$$\mu = \arcsin \left(\cos \tau - 2 \cdot d_x \cdot \frac{I_d}{I_{dn}} \cdot \frac{U_{d1on}}{U_{d1o}} \right) \quad (a.7)$$

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{2\mu + \sin 2\tau - \sin 2(\tau + \mu)}{4 \cdot (\cos \tau - \cos(\tau + \mu))} \quad (a.8)$$

A potência reativa consumida pela conversora pode ser obtida pela relação abaixo:

$$Q_d = P_d \cdot \operatorname{tg} \phi = U_d \cdot I_d \cdot \operatorname{tg} \phi \quad (a.9)$$

Entretanto a potência reativa pode também ser obtida, com grande grau de precisão, pela relação aproximada que se segue. Esta relação considera nulo o ângulo de comutação.

$$Q_d = P_d \left(\left(\frac{U_{d1o}}{U_d} \right)^2 - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (a.10)$$

Apêndice B.

Programa Fortran para Cálculo da Região Operativa.

B..1- Descrição Geral.

Este programa foi elaborado para cálculo da região operativa da ECS ilustrada na figura 13, capítulo 3.

O número de pontos calculados em cada curva é definido nos dados de entrada. Para cada um destes pontos são calculadas diversas grandezas auxiliares necessárias na especificação da ECS. O programa fornece, como resultado, uma tabela com as seguintes variáveis:

U_h , U_{alo} , U_d , I_d , P_d , Q_d , S_d , Tape, τ e μ .

B..2- Descrição dos Dados de Entrada.

Os dados de entrada, descritos no quadro B.1, são divididos em cinco cartões. Os três primeiros destinam-se às variáveis previamente definidas nas premissas. Os demais cartões são designados aos dados de controle do programa.

QUADRO B.1 - Dados de Entrada.

Cartão	Formato de Leitura	Variáveis
1	6F11.6	U _{dn} , U _{dion} , I _{dn} , I _{dmin} , I _{dmax} , P _{dn}
2	6F11.6	τ_{des} , τ_{max} , τ_{min} , dxn
3	6F11.6	U _h , REL, PAS, TAP _{max} , TAP _{min}
4	2I3	N6P, LCH
5	I3	NS

onde:

- .REL é a relação nominal dos transformadores conversores.
- .PAS é a largura percentual de cada passo do LTC.
- .N6P é o número de pontes de 6 pulsos.
- .LCH deve ser igual a 1 para fazer d_x variar linearmente com a posição do LTC.
- .NS é o número de pontos a serem calculados em cada curva.

B.3.- Caso Exemplo.

a) Dados de Entrada:

$U_{dn} = 8,74 \text{ kV}$; $U_{dion} = 9,75 \text{ kV}$; $I_{dn} = 1,43 \text{ kA}$; $I_{dmin} = 0,143 \text{ kA}$;
 $I_{dmax} = 1,716 \text{ kA}$; $P_{dn} = 12,5 \text{ MW}$; $\tau_{des} = \tau_{min} = 17^\circ$; $\tau_{max} = 47,5^\circ$;
 $U_{hn} = 13,8 \text{ kV}$; REL = 1,91; PAS = 2%; TAP_{max} = 18; TAP_{min} = -12;
 N6P = 1; LCH = 1; NS = 1;

b) Cartões de Entrada:

.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....
8.74	9.75	1.430	0.143	1.716	12.50
17.00	47.50	17.00	0.06	0.00	0.00
13.80	1.91	0.02	18.00	-12.00	
1 1					
2					

c) Tabela de Saída:

ESTACAO CONVERSORA SERIE									
UAC	UDIO	UD	ID	PD	QD	S	GAMMA	TAP	U
TAP E GAMMA MAXIMOS (A-B)									
13.800	7.171	4.049	1.430	5.790	8.426	10.223	47.500	18.000	15.523
13.800	7.171	3.969	1.573	6.244	9.345	11.239	47.500	18.000	16.941
13.800	7.171	3.890	1.716	6.675	10.276	12.253	47.500	18.000	18.342
CORRENTE CONSTANTE (B-C)									
13.800	7.171	5.021	1.716	8.616	8.682	12.232	33.552	18.000	21.904
13.800	7.502	6.153	1.716	10.558	7.180	12.768	19.637	15.000	26.058
13.800	8.555	7.284	1.716	12.500	7.537	14.597	19.080	7.000	21.639
POTENCIA CONSTANTE (C-D)									
13.800	8.866	7.713	1.621	12.500	6.940	14.297	17.782	5.000	20.250
13.800	9.377	8.195	1.525	12.500	6.848	14.253	19.418	2.000	17.003
13.800	9.753	8.741	1.430	12.500	6.082	13.901	17.000	.000	16.248
POTENCIA CONSTANTE (D-E)									
13.800	11.082	10.092	1.239	12.500	5.617	13.704	18.028	-6.000	11.465
13.800	11.893	10.941	1.142	12.500	5.287	13.572	17.790	-9.000	9.622
13.800	12.832	11.946	1.046	12.500	4.873	13.416	17.000	-12.000	8.097
TAP E GAMMA MINIMOS (E-F)									
13.800	12.832	12.060	.681	8.215	2.977	8.738	17.000	-12.000	5.588
13.800	12.832	12.143	.412	5.004	1.707	5.287	17.000	-12.000	3.556
13.800	12.832	12.227	.143	1.748	.557	1.835	17.000	-12.000	1.309
CORRENTE CONSTANTE (F-G)									
13.800	10.375	9.740	.143	1.393	.511	1.484	19.253	-3.000	1.765
13.800	7.740	7.252	.143	1.037	.386	1.107	18.824	13.000	3.133
13.800	7.740	4.765	.143	.681	.826	1.071	47.500	18.000	1.578
TAP E GAMMA MAXIMOS (G-A)									
13.800	7.171	4.526	.572	2.589	3.179	4.100	47.500	18.000	6.569
13.800	7.171	4.288	1.001	4.292	5.740	7.167	47.500	18.000	11.153
13.800	7.171	4.049	1.430	5.790	8.426	10.223	47.500	18.000	15.523
CORRENTE CONSTANTE (A-D)									
13.800	7.171	5.613	1.430	8.027	6.291	10.198	26.657	18.000	21.140
13.800	8.265	7.177	1.430	10.263	5.739	11.759	17.837	9.000	20.457
13.800	9.753	8.741	1.430	12.500	6.082	13.901	17.000	.000	16.248

d) Programa Fonte:

```

C
C      ESTACAO CONVERSORA SERIE
C
C      DETERMINACAO DA REGIAO OPERATIVA
C
C* * * * * BLOCOS DE COMMON
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
      REAL*8 ID,IDN,IDMIN,IDMAX,IDINI,IDFIM,IDSET
      COMMON /CMAIN/UH,UDN,UDION,IDN,IDMIN,IDMAX,PDN,GAMMDS,
1         GAMMAX,GAMMIN,DXN,DR,UT,REL,PAS,TAPMAX,TAPMIN,
2         N6P,LCH,PI,CONV,TK,THMAX,THMIN,IDINI,PD,
3         IDFIM,DID,KT,IDSET,VDFIM,DUD,PDSET,ID,UD
C* * * * *
      COMMON /CTG/ITFIM,GAMMA,DX,TH,TAP,UDIO
C* * * * *
      COMMON /CQDR/QD,RMI,S
C
C* * * * * DADOS DE ENTRADA
C* *1.DADOS DOS CONVERSORES
      READ(5,200)UDN,UDION,IDN,IDMIN,IDMAX,PDN
C      WRITE(6,200)UDN,UDION,IDN,IDMIN,IDMAX,PDN
C      READ(5,200)GAMMDS,GAMMAX,GAMMIN,DXN,DR,UT
C      WRITE(6,200)GAMMDS,GAMMAX,GAMMIN,DXN,DR,UT
C      READ(5,200)UH,REL,PAS,TAPMAX,TAPMIN
C      WRITE(6,200)UH,REL,PAS,TAPMAX,TAPMIN
C* *2.DADOS DE CONTROLE
      READ(5,210)N6P,LCH
C      WRITE(6,210)N6P,LCH
      READ(5,215)NS
C      WRITE(6,215)NS
C* *3.FORMATOS DE ENTRADA
200 FORMAT(6F11.6)
210 FORMAT(3I3)
215 FORMAT(I3)
C* * * * * INICIALIZACAO DAS VARIAVEIS
      IF(NS.EQ.0)NS=10
      PI=3.14159265358979D0
      CONV=PI/180.D0
      GAMMDS=GAMMDS*CONV
      GAMMAX=GAMMAX*CONV
      GAMMIN=GAMMIN*CONV
      TK=PI*REL/(3.D0*DSQRT(2.D0)*UH)
      THMAX=TAPMAX*PAS+1.D0
      THMIN=TAPMIN*PAS+1.D0
      WRITE(6,500)
      WRITE(6,505)
500 FORMAT(' ',50X,'ESTACAO CONVERSORA SERIE')
505 FORMAT(' ',//,16X,'UH',6X,'UDIO',7X,'UD',8X,'ID',9X,'PD',
1      8X,'QD',8X,'S',6X,'GAMMA',7X,'TAP',8X,'U')
C* * * * * ROTINA PRINCIPAL* * * * *
C* * * * * CURVA A-B * * * * *
      IDINI=IDN
      IDFIM=IDMAX
      DID=(IDFIM-IDINI)/NS
      KT=1
      CALL TGCTE
C* * * * * CURVA B-C * * * * *
      IDSET=IDMAX
      VDFIM=PDN/IDSET

```

```

      VDINI=(NS*UD+VDFIM)/(NS+1)
      DUD=(VDFIM-VDINI)/NS
      CALL IDCTE
C* * * * * CURVA C-D * * * * *
      PDSET=PDN
      IDFIM=IDN
      IDINI=(NS*ID+IDFIM)/(NS+1)
      DID=(IDFIM-IDINI)/NS
      CALL PDCTE
C* * * * * CURVA D-E * * * * *
      PDSET=PDN
      CALL IDF
      IDINI=(NS*ID+IDFIM)/(NS+1)
      DID=(IDFIM-IDINI)/NS
      CALL PDCTE
C* * * * * CURVA E-F * * * * *
      IDFIM=IDMIN
      IDINI=(NS*ID+IDFIM)/(NS+1)
      DID=(IDFIM-IDINI)/NS
      KT=0
      CALL TGCTE
C* * * * * CURVA F-G * * * * *
      IDSET=IDMIN
      CALL UDF
      VDINI=(NS*UD+VDFIM)/(NS+1)
      DUD=(VDFIM-VDINI)/NS
      CALL IDCTE
C* * * * * CURVA G-A * * * * *
      IDFIM=IDN
      IDINI=(NS*ID+IDFIM)/(NS+1)
      DID=(IDFIM-IDINI)/NS
      KT=1
      CALL TGCTE
C* * * * * CURVA A-D * * * * *
      IDSET=IDN
      VDFIM=UDN
      VDINI=(NS*UD+VDFIM)/(NS+1)
      DUD=(VDFIM-VDINI)/NS
      CALL IDCTE
C* * * * *
      END

      SUBROUTINE IDCTE
C* * * * * BLOCOS DE COMMON
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
      REAL*8 ID,IDN,IDMIN,IDMAX,IDINI,IDFIM,IDSET
      COMMON /CMAIN/UH,UDN,UDION,IDN,IDMIN,IDMAX,PDN,GAMMDS,
1          GAMMAX,GAMMIN,DXN,DR,UT,REL,PAS,TAPMAX,TAPMIN,
2          N6P,LCH,PI,CONV,TK,THMAX,THMIN,IDINI,PD,
3          IDFIM,DID,KT,IDSET,VDINI,VDFIM,DUD,PDSET,ID,UD
C* * * * *
      COMMON /CTG/ITFIM,GAMMA,DX,TH,TAP,UDIO
C* * * * *
      COMMON /CQDR/QD,RMI,S
C* * * * *
      WRITE(6,510)
      WRITE(6,505)
      ID=IDSET
      UD=VDINI

```

```

10 IF(DABS(VDFIM-UD+DUD).GE.0.0001D0) THEN
    PD=UD*ID
    CALL TG
    CALL QDR
    WRITE(6,550)UH,UDIO,UD,ID,PD,QD,S,GAMMA,TAP,RMI
    UD=UD+DUD
    GOTO 10
END IF
RETURN
505 FORMAT(' ',//,16X,'UH',6X,'UDIO',7X,'UD',8X,'ID',9X,'PD',
1      8X,'QD',8X,'S',6X,'GAMMA',7X,'TAP',8X,'U')
510 FORMAT(' ',52X,'CORRENTE CONSTANTE')
515 FORMAT(' ',30X,'LIMITE DE PONTOS ATINGIDO NA ROTINA
IDCTE.',//,
1      'AUMENTAR DELTA(DEFAULT=1.) OU LIM(DEFAULT=1000)')
550 FORMAT(' ',10X,10F10.3)
END

```

```

SUBROUTINE PDCTE
C* * * * * BLOCOS DE COMMON
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
REAL*8 ID,IDN,IDMIN,IDMAX,IDINI,IDFIM,IDSET
COMMON /CMAIN/UH,UDN,UDION,IDN,IDMIN,IDMAX,PDN,GAMMDS,
1      GAMMAX,GAMMIN,DXN,DR,UT,REL,PAS,TAPMAX,TAPMIN,
2      N6P,LCH,PI,CONV,TK,THMAX,THMIN,IDINI,PD,
3      IDFIM,DID,KT,IDSET,VDINI,VDFIM,DUD,PDSET,ID,UD
C* * * * *
COMMON /CTG/ITFIM,GAMMA,DX,TH,TAP,UDIO
C* * * * *
COMMON /CQDR/QD,RMI,S
C* * * * *
WRITE(6,510)
WRITE(6,505)
PD=PDSET
ID=IDINI
10 IF(DABS(IDFIM-ID+DID).GE.0.0001D0) THEN
    UD=PD/ID
    CALL TG
    CALL QDR
    WRITE(6,550)UH,UDIO,UD,ID,PD,QD,S,GAMMA,TAP,RMI
    ID=ID+DID
    GOTO 10
END IF
RETURN
505 FORMAT(' ',//,16X,'UH',6X,'UDIO',7X,'UD',8X,'ID',9X,'PD',
1      8X,'QD',8X,'S',6X,'GAMMA',7X,'TAP',8X,'U')
510 FORMAT(' ',52X,'POTENCIA CONSTANTE')
550 FORMAT(' ',10X,10F10.3)
END

```

```

SUBROUTINE TGCTE
C* * * * * BLOCOS DE COMMON
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
REAL*8 ID,IDN,IDMIN,IDMAX,IDINI,IDFIM,IDSET
COMMON /CMAIN/UH,UDN,UDION,IDN,IDMIN,IDMAX,PDN,GAMMDS,
1      GAMMAX,GAMMIN,DXN,DR,UT,REL,PAS,TAPMAX,TAPMIN,
2      N6P,LCH,PI,CONV,TK,THMAX,THMIN,IDINI,PD,
3      IDFIM,DID,KT,IDSET,VDINI,VDFIM,DUD,PDSET,ID,UD
C* * * * *

```

```

COMMON /CTG/ITFIM,GAMMA,DX,TH,TAP,UDIO
C* * * * *
COMMON /CQDR/QD,RMI,S
C* * * * *
C* * *TAP E GAMMA MINIMOS
  IF(KT.EQ.0) THEN
    WRITE(6,510)
    TH=THMIN
    GAMMAT=GAMMIN
C* * *TAP E GAMMA MAXIMOS
  ELSE
    WRITE(6,520)
    TH=THMAX
    GAMMAT=GAMMAX
  END IF
C* * *CALCULOS COMUNS
  WRITE(6,505)
  ID=IDINI
  TAP=(TH-1.D0)/PAS
  U1N=REL*UDION*PI/3.D0/DSQRT(2.D0)
  UDIO=UH/U1N*UDION/TH
  DX=DXN
  IF(LCH.EQ.1) DX=DX*TH
10 IF(DABS(IDFIM-ID+DID).GE.0.0001D0) THEN
  GAMMA=GAMMAT
  UD=N6P*(UDIO*DCOS(GAMMA)+UT-(DX-DR)*ID*UDION/IDN)
  PD=UD*ID
  CALL QDR
  WRITE(6,550)UH,UDIO,UD,ID,PD,QD,S,GAMMA,TAP,RMI
  ID=ID+DID
  GOTO 10
END IF
RETURN
C* * *FORMATOS DE SAIDA
505 FORMAT(' ',//,16X,'UH',6X,'UDIO',7X,'UD',8X,'ID',9X,'PD',
1      8X,'QD',8X,'S',6X,'GAMMA',7X,'TAP',8X,'U')
510 FORMAT(' ',52X,'TAP E GAMMA MINIMOS')
520 FORMAT(' ',52X,'TAP E GAMMA MAXIMOS')
550 FORMAT(' ',10X,10F10.3)
END

SUBROUTINE TG
C* * *CALCULO DE GAMMA,TAP E UDIO
C* * * * * BLOCOS DE COMMON
  IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
  REAL*8 ID,IDN,IDMIN,IDMAX,IDINI,IDFIM,IDSET
  COMMON /CMAIN/UH,UDN,UDION,IDN,IDMIN,IDMAX,PDN,GAMMDS,
1      GAMMAX,GAMMIN,DXN,DR,UT,REL,PAS,TAPMAX,TAPMIN,
2      N6P,LCH,PI,CONV,TK,THMAX,THMIN,IDINI,PD,
3      IDFIM,DID,KT,IDSET,VDINI,VDFIM,DUD,PDSET,ID,UD
C* * * * *
COMMON /CTG/ITFIM,GAMMA,DX,TH,TAP,UDIO
C* * * * *
COMMON /CQDR/QD,RMI,S
C* * * * *
  LKONT=1
  ITFIM=0
  GAMMA=GAMMDS
  IF(LCH.NE.1) THEN

```

```

C* * * * *
* * *
C* * * * * * * CALCULO TAP DESPREZANDO A VARIACAO DE DX COM A
*
C* * * * * * * *POSICAO DO TAP
*
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
* * *
      DX=DXN
      FAT=TK*(UD/N6P+(DX-DR)*ID/IDN*UDION-UT)
      TH=DCOS(GAMMA)/FAT
    ELSE
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
* * *
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
A
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
*
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
* * *
      ATH=DXN*ID/IDN*UDION
      BTH=UD/N6P-UT-DR*ID/IDN*UDION
      CTH=-DCOS(GAMMA)/TK
      DELTH=DSQRT(BTH**2-4.DO*ATH*CTH)
      TH=(-BTH+DELTH)/(2.DO*ATH)
    END IF
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
* * *
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
*
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
* * *
      10 IF(TH.GE.THMAX) TH=THMAX
      IF(TH.LE.THMIN) TH=THMIN
      ITAP=NINT((TH-1.DO)/PAS)
      TH=ITAP*PAS+1.DO
      TAP=(TH-1.DO)/PAS
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
* * *
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
*
      IF(LCH.EQ.1) THEN
        DX=TH*DXN
        FAT=TK*(UD/N6P+(DX-DR)*ID/IDN*UDION-UT)
      END IF
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
* * *
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
*
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
* * *
      IF(TH*FAT.GT.1.DO) THEN
        GAMMA=GAMMIN-0.00000001DO
      ELSE
        GAMMA=DACOS(TH*FAT)
      END IF
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
* * *
C* * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
* * *
      TESTE DOS LIMITES DE GAMMA

```

```

*
C* * * * *
* * *
      IF(GAMMA.LE.GAMMAX.AND.GAMMA.GE.(GAMMIN-0.00001D0)) THEN
          UDIO=1.D0/(TK*TH)
          RETURN
      ELSE
          IF((TH.EQ.THMAX.AND.GAMMA.GT.GAMMAX).
1          OR.(TH.EQ.THMIN.AND.GAMMA.LT.GAMMIN)) THEN
              RETURN
          ELSE
              IF(GAMMA.GT.GAMMAX) TH=(ITAP+1)*PAS+1.D0
              IF(GAMMA.LT.GAMMIN) TH=(ITAP-1)*PAS+1.D0
              GOTO 10
          END IF
      END IF
1  FORMAT(/,'LIMITES DE TAP E GAMMA ATINGIDOS')
  END

  SUBROUTINE QDR
C* * * * * CALCULOS DAS POTENCIAS APARENTE, REATIVA E ANGULO DE
COMUTACAO
C* * * * * BLOCOS DE COMMON
  IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
  REAL*8 ID, IDN, IDMIN, IDMAX, IDINI, IDFIM, IDSET
  COMMON /CMAIN/UH,UDN,UDION,IDN, IDMIN, IDMAX, PDN, GAMMDS,
1      GAMMAX, GAMMIN, DXN, DR, UT, REL, PAS, TAPMAX, TAPMIN,
2      N6P, LCH, PI, CONV, TK, THMAX, THMIN, IDINI, PD,
3      IDFIM, DID, KT, IDSET, VDINI, VDFIM, DUD, PDSET, ID, UD
C* * * * *
  COMMON /CTG/ITFIM, GAMMA, DX, TH, TAP, UDIO
C* * * * *
  COMMON /CQDR/QD, RMI, S
C* * * * *
  AUX=2.D0*DX*ID/IDN*UDION/UDIO
  RMI=DACOS(DCOS(GAMMA)-2.D0*DX*ID/IDN*UDION/UDIO)-GAMMA
  X=2.*RMI+DSIN(2.D0*GAMMA)-DSIN(2.D0*(GAMMA+RMI))
  X=X/(4.D0*(DCOS(GAMMA)-DCOS(GAMMA+RMI)))
  QD=X*ID*UDIO
  RMI=RMI/CONV
  GAMMA=GAMMA/CONV
  S=DSQRT(PD**2+QD**2)
  RETURN
  END

  SUBROUTINE IDF
C
C* * * * * CALCULO DE IDFIM PARA TAP E GAMMA MINIMOS
C
  IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
  REAL*8 ID, IDN, IDMIN, IDMAX, IDINI, IDFIM, IDSET
  COMMON -/CMAIN/UH,UDN,UDION,IDN, IDMIN, IDMAX, PDN, GAMMDS,
1      GAMMAX, GAMMIN, DXN, DR, UT, REL, PAS, TAPMAX, TAPMIN,
2      N6P, LCH, PI, CONV, TK, THMAX, THMIN, IDINI, PD,
3      IDFIM, DID, KT, IDSET, VDINI, VDFIM, DUD, PDSET, ID, UD
C* * * * *
  COMMON /CTG/ITFIM, GAMMA, DX, TH, TAP, UDIO
C* * * * *
  COMMON /CQDR/QD, RMI, S

```


C* * * * *

```

TH=THMIN
GAMMA=GAMMIN
U1N=REL*UDION*PI/3.D0/DSQRT(2.D0)
UDIO=UH/U1N*UDION/TH
DX=DXN
IF(LCH.EQ.1) DX=DX*TH
UA=1.D0/N6P
UB=-UDIO*DCOS(GAMMA)-UT
UC=DX*PDSET*UDION/IDN
UDELT=DSQRT(UB**2-4.D0*UA*UC)
VDFIM=(-UB+UDELT)/2.D0/UA
IDFIM=PDSET/VDFIM
RETURN
END

```

SUBROUTINE UDF

C

C* * *CALCULO DE VDFIM PARA TAP E GAMMA MAXIMOS

C

```

IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
REAL*8 ID,IDN,IDMIN,IDMAX,IDINI,IDFIM,IDSET
COMMON /CMAIN/UH,UDN,UDION,IDN,IDMIN,IDMAX,PDN,GAMMDS,
1      GAMMAX,GAMMIN,DXN,DR,UT,REL,PAS,TAPMAX,TAPMIN,
2      N6P,LCH,PI,CONV,TK,THMAX,THMIN,IDINI,PD,
3      IDFIM,DID,KT,IDSET,VDINI,VDFIM,DUD,PDSET,ID,UD

```

C* * * * *

```

COMMON /CTG/ITFIM,GAMMA,DX,TH,TAP,UDIO

```

C* * * * *

```

COMMON /CQDR/QD,RMI,S

```

C* * * * *

```

TH=THMAX
GAMMA=GAMMAX
U1N=REL*UDION*PI/3.D0/DSQRT(2.D0)
UDIO=UH/U1N*UDION/TH
DX=DXN
IF(LCH.EQ.1) DX=DX*TH
VDFIM=N6P*(UDIO*DCOS(GAMMA)+UT-(DX-DR)*IDSET*UDION/IDN)
RETURN
END

```

Apêndice C.

Estudo de Harmônicos CC - Resultados.

C.1.- Descrição.

Neste apêndice são apresentados os resultados dos casos simulados, listados no quadro 19 do capítulo 7, transcrito a seguir. Para cada um destes casos correspondem dois gráficos. O primeiro mostra a corrente de distúrbio I_d , ao longo da linha, e o segundo, os seus componentes harmônicos de maior peso.

QUADRO 19 - Lista de Casos Estudados

Caso	Comprimento da Linha (km)	Posição da ECS	Reator de Alisamento (mH)
1	800	A	-
2	800	A	75
3	800	B	-
4	800	B	75
5	500	A	-
6	500	A	75
7	500	B	-
8	500	B	75
9	500	B	*

* - Reator substituído por uma filtro em paralelo com a ECS.

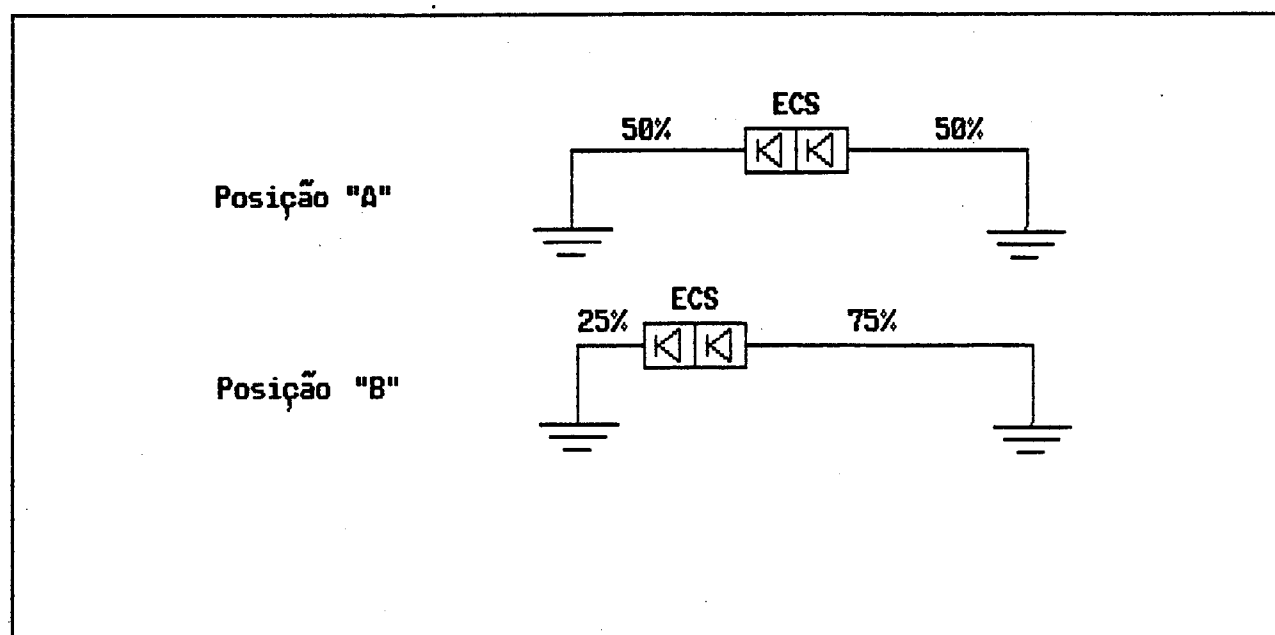


FIGURA 28 - Localizações da ECS.

Apêndice D.

Equacionamento Básico de uma Conversora CA/CC de Comutação Natural.

D.1.- Introdução.

Este apêndice se dedica à análise e equacionamento do funcionamento de uma ponte conversora trifásica, usada em aplicações CCAT. Sua leitura, bem como das referências [1] e [2], é recomendável para os leitores ainda não familiarizados com o tema.

O circuito objeto de análise é apresentado na figura 32 e possui as seguintes características:

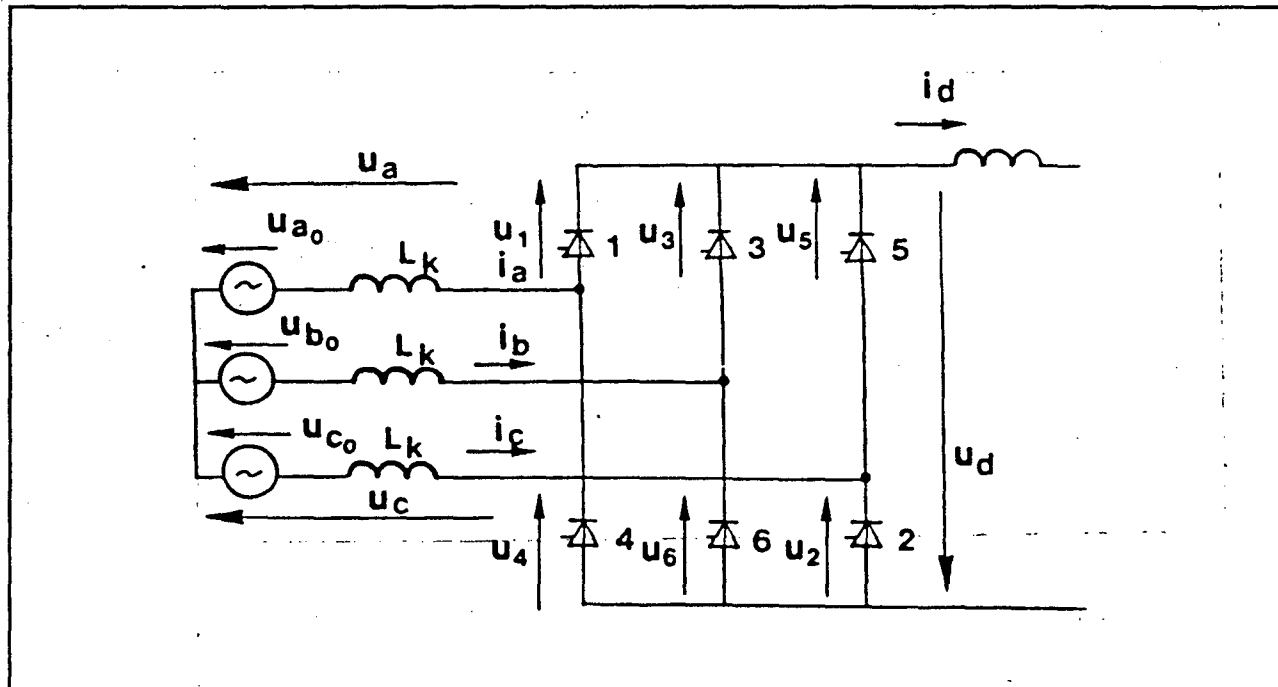


FIGURA 32 - Ponte Conversora de 6 pulsos.

.As tensões CA (fase-neutro) que alimentam as pontes são puramente senoidais e simétricas, dadas por equações do tipo:

$$u_a = U_f \cos (wt + 60^\circ) \quad (d.1)$$

$$u_b = U_f \cos (wt - 60^\circ) \quad (d.2)$$

$$u_c = U_f \cos (wt - 180^\circ) \quad (d.3)$$

onde U_f é o valor de pico da tensão fase-neutro.

.Os transformadores conversores são representados exclusivamente por suas reatâncias de dispersão, com mesma magnitude nas tres fases. As perdas não são consideradas.

.As válvulas de tiristores são ideais, isto é, sem perdas.

.Os pulsos de disparo das válvulas ocorrem em intervalos iguais a $1/6$ de ciclo.

D.2.- Análise sem Considerar o Efeito da Comutação.

Assume-se aqui que a comutação da corrente entre as válvulas ocorre instantaneamente, o que é uma simplificação, conforme será visto oportunamente.

A grosso modo, uma das condições necessárias para que uma válvula de tiristores entre em condução é que a tensão de anodo seja maior que a tensão de catodo. Diz-se então que a válvula está polarizada positivamente. A outra condição necessária é que seja fornecido um

pulso de tensão ao gatilho dos tiristores que compõem a válvula, comumente conhecido como pulso de disparo. Durante a condução, a válvula pode ser considerada como um curto-circuito.

A análise que se segue diz respeito às figuras 32 e 33. Anteriormente ao instante t_a a válvula 1 está em condução, comportando-se, portanto, como um curto-circuito. A partir deste instante, a válvula 3 pode ser disparada ($u_b > u_a$), e esta condição permanece até o instante t_r , ou seja, durante um intervalo de 180° elétricos.

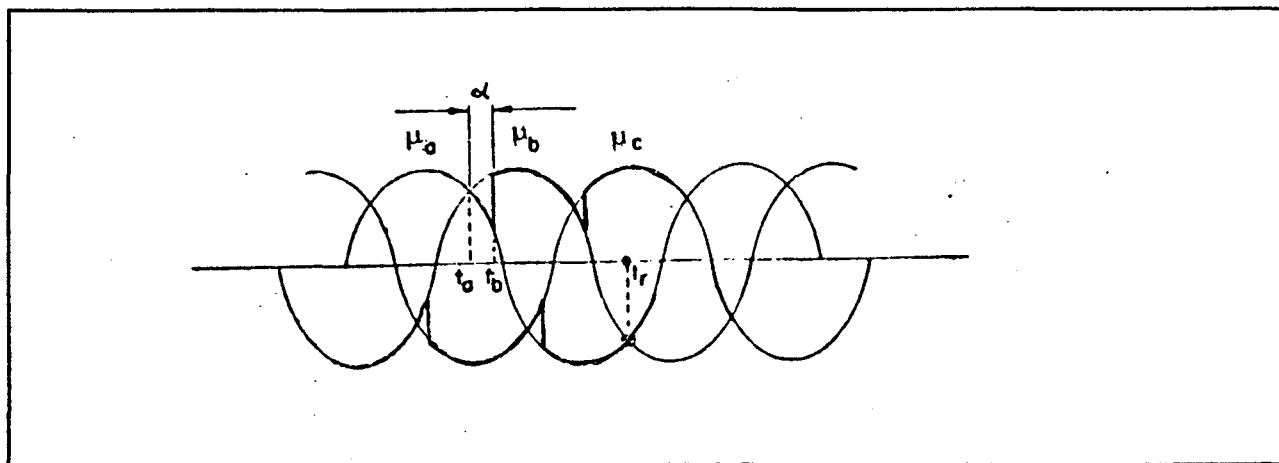


FIGURA 33 - Análise da Tensão CC ($\alpha > 0$).

No instante t_b é fornecido o pulso de disparo aos tiristores da válvula 3, que entra em condução, ao mesmo tempo em que a válvula 1 deixa de conduzir. Há então uma comutação instantânea de corrente entre as válvulas 1 e 3.

O ângulo α representa o atraso, medido a partir do instante em que a válvula é polarizada positivamente, sendo por isso conhecido como ângulo de atraso ou disparo.

Ainda com referência à figura 33, a curva em negrito da porção superior representa a tensão do terminal positivo, em relação ao neutro, correspondente aos intervalos de condução das válvulas 1, 3 e 5. Da mesma forma destaca-se a tensão do terminal negativo, na porção inferior da curva, correspondente, por sua vez, aos intervalos de condução das válvulas 2, 4 e 6.

A tensão U_d é obtida pela diferença entre a tensão do terminal positivo e negativo. Uma análise da figura 33 mostra que a diferença entre estas tensões acompanha a forma de onda da tensão fase-fase, conforme apresenta a figura 34, para vários valores de α .

Na figura 34 observa-se que o valor médio de U_d reduz-se, na medida em que α aumenta, sendo máximo para $\alpha=0^\circ$ e nulo para $\alpha=90^\circ$. Quando o ângulo de disparo ultrapassa 90° , o valor médio da tensão passa a ser negativo, atingindo módulo máximo em $\alpha=180^\circ$.

O cálculo do valor médio da tensão retificada, para um ângulo de atraso α é feito como se segue:

$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_{\pi/3 + \alpha}^{2\pi/3 + \alpha} u_{ac} d(\omega t) = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} U_t \cos \alpha \quad (d.4)$$

Se escrita em função do valor rms da tensão CA fase-fase (U_h), a equação acima assume a seguinte forma:

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_h \cos \alpha \quad (d.5)$$

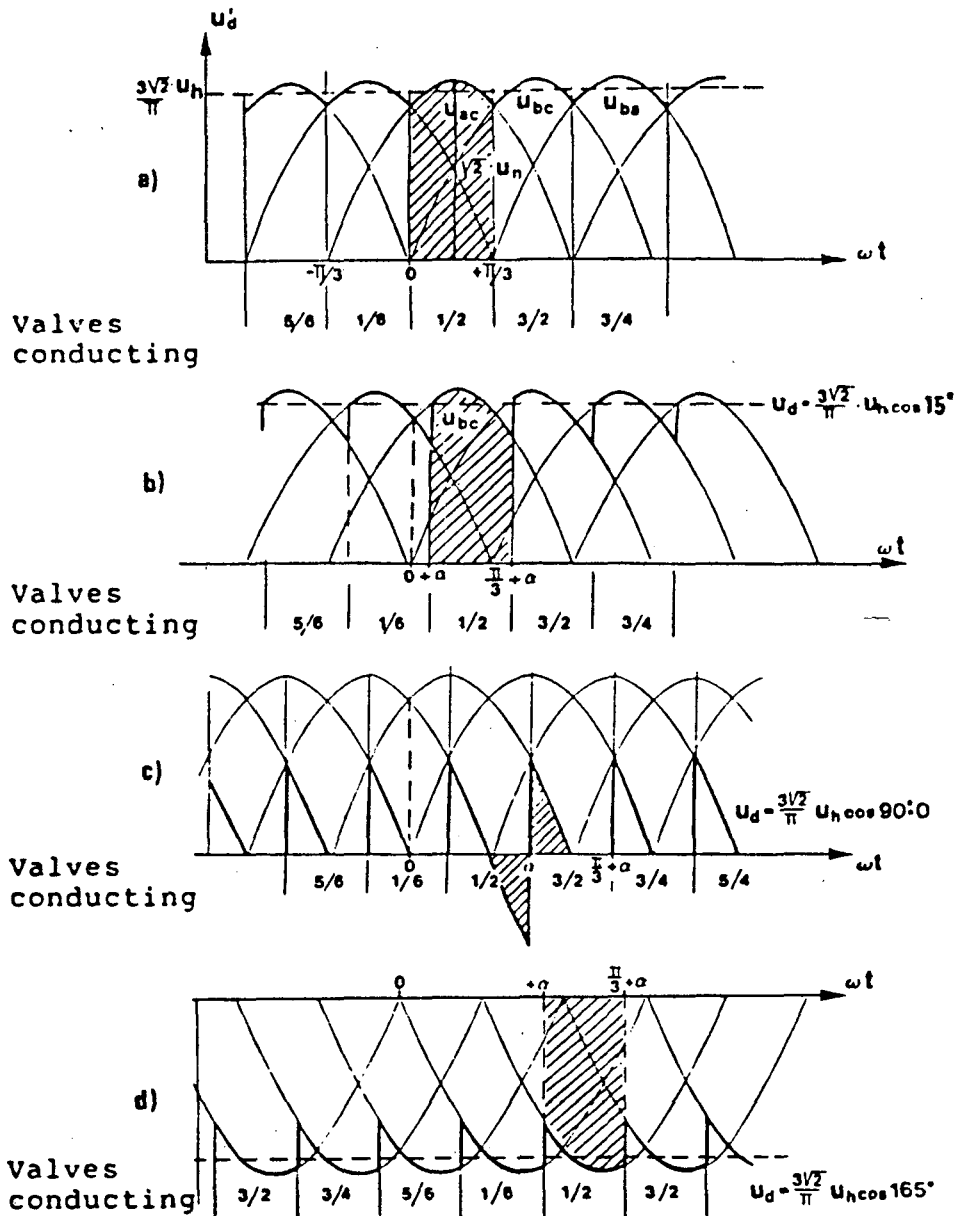


FIGURA 34 - Tensões na Ponte Conversora:

- a) $\alpha = 0^\circ$
- b) $\alpha = 15^\circ$
- c) $\alpha = 90^\circ$
- d) $\alpha = 195^\circ$

O valor de U_d , considerando-se nulo o ângulo de disparo e desprezando-se o efeito da comutação, é denominado de tensão CC ideal a vazio e dada por:

$$U_{d10} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_h \quad (d.5)$$

Da equação (d.4) conclui-se que, em condições ideais, a tensão CC pode variar de $+U_{d10}$ a $-U_{d10}$. Para valores positivos de U_d a conversora opera como retificador. Para valores negativos como inversor.

Com relação à produção de harmônicos do lado CC é conveniente notar que o "ripple", e em consequência os harmônicos, aumentam com α , até 90° . A partir daí os harmônicos decrescem atingindo novamente o mínimo em $\alpha = 180^\circ$.

A corrente injetada pela conversora em cada uma das fases CA é composta por pulsos de amplitude igual ao valor da corrente CC, denotada por I_d . Na figura 35 são apresentadas a tensão da fase "a", em relação ao neutro, e a corrente nesta mesma fase.

Conforme indicado, se o valor de α é nulo, os pulsos retangulares de corrente estão centrados com relação à onda de tensão. Verifica-se que a componente fundamental da corrente, i_{a1} , está em fase com u_a . Para valores de α diferentes de zero, os blocos de corrente e a componente fundamental são deslocados para a direita, deste mesmo ângulo. Há, portanto, uma igualdade entre o ângulos do fator de potência ϕ e de disparo α .

A componente fundamental da corrente pode ser obtida por análise de Fourier, alcançando-se a relação abaixo:

$$i_{a1} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \cos(\omega t - \alpha) \quad (d.6)$$

O valor rms desta componente fundamental é dada por:

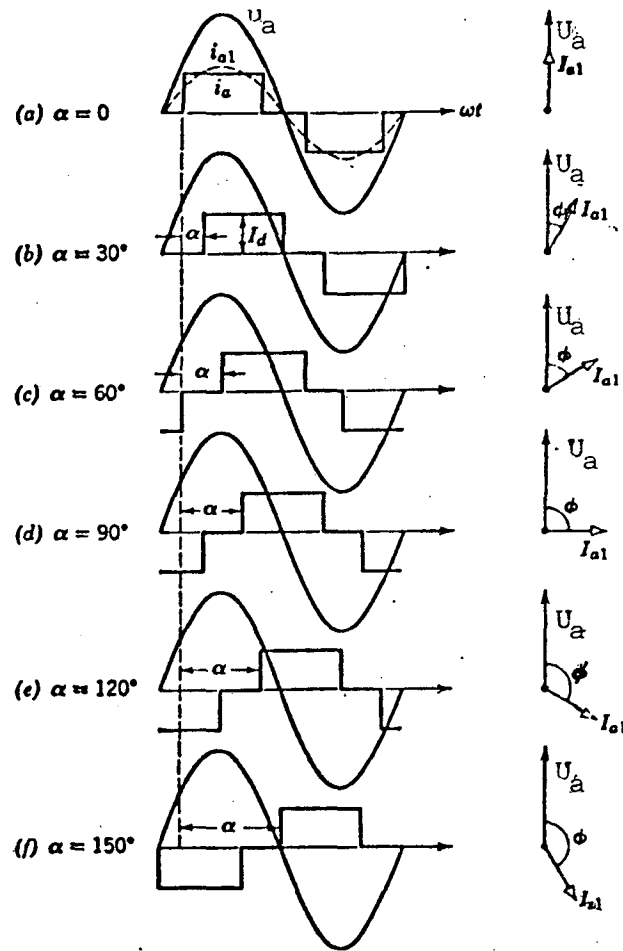


FIGURA 35 - Tensão e Corrente CA (fase a).

$$I_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \quad (\text{d.7})$$

A potência aparente é fornecida, por definição, pela relação que se segue:

$$S_1 = \sqrt{3} U_h I_1 = U_{d10} I_d \quad (\text{d.8})$$

A igualdade entre ϕ e α pode ser verificada matematicamente através da conservação de energia. Como as perdas não são consideradas, a potência ativa nos lados CA e CC da conversora são iguais. Portanto

tem-se:

$$P = S_1 \cos \phi = U_d I_d = U_{d10} I_d \cos \alpha \quad (d.9)$$

A inserção da equação (d.8) na equação (d.9) resulta em:

$$\cos \phi = \cos \alpha = U_d / U_{d10} \quad (d.10)$$

A potência reativa consumida pela conversora é definida por:

$$Q = P \left(\left(\frac{S_1}{P} \right)^2 - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (d.11)$$

Das relações anteriormente deduzidas para as potências ativa e aparente chega-se ao seguinte resultado para a potência reativa.

$$Q = P \left(\left(\frac{U_{d10}}{U_d} \right)^2 - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (d.12)$$

Cabe ressaltar que a equação (d.12) é válida como uma boa aproximação mesmo quando o efeito da comutação não é desprezado.

D.3.- Análise do Efeito da Comutação.

Devido à reatância indutiva do transformador conversor, a comutação de corrente entre duas fases consecutivas não ocorre instantaneamente, conforme assumido na análise precedente. A duração da comutação, medida em graus ou radianos, é chamada ângulo

de comutação ou "overlap" e denotada pela letra μ .

Durante a comutação da válvula 1 para a válvula 3, o circuito equivalente tem a configuração mostrada na figura 36.

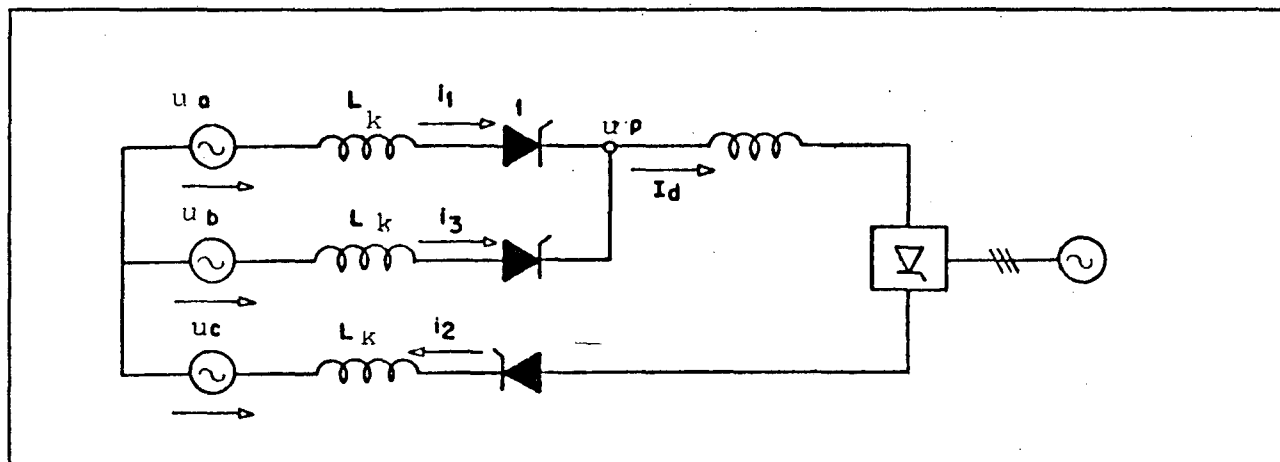


FIGURA 36 - Comutação da Válvula 1 para a 3.

Conforme indicado, durante a comutação três válvulas estão conduzindo simultaneamente. A seqüência de condução é 12, 123, 23, 234, 34, 345, 45, 456, 56, 561, 61, 612 e novamente 12, desde que $\mu < 60^\circ$. Se o ângulo μ é superior a 60° haverá intervalos com quatro válvulas em condução.

Pelo circuito da figura 36 é válida a seguinte equação durante a comutação:

$$u_b - u_a = L_k \frac{di_3}{dt} - L_k \frac{di_1}{dt} \quad (d.13)$$

As seguintes substituições podem ser feitas:

$$u_b - u_a = \sqrt{3} U_L \sin wt \quad (d.14)$$

$$i_1 = I_d - i_3 : \frac{di_3}{dt} = - \frac{di_1}{dt} \quad (d.15)$$

Chega-se, desta forma, a:

$$\sqrt{3} U_f \text{ sen } wt = 2 L_k \frac{di_3}{dt} \quad (d.16)$$

Resolvendo a equação (d.16) em termos de i_3 e considerando a condição inicial $i_3 = 0$ para $wt = \alpha$, chega-se finalmente à equação de i_3 durante a comutação.

$$i_3 = \frac{\sqrt{3} U_f}{2 \omega L_k} (\cos \alpha - \cos wt) \quad (d.17)$$

Graficamente a comutação entre as válvulas 1 e 3 é apresentada na figura 37, onde identifica-se :

$$I_s = \frac{\sqrt{3} U_f}{2 \omega L_k} \quad (d.17)$$

A tensão u_p , no circuito da figura 36, é obtida a seguir.

$$u_p = u_a - L_k \frac{di_1}{dt} \quad (d.16)$$

$$u_p = u_b - L_k \frac{di_3}{dt} \quad (d.17)$$

Somando-se as duas equações anteriores chega-se a:

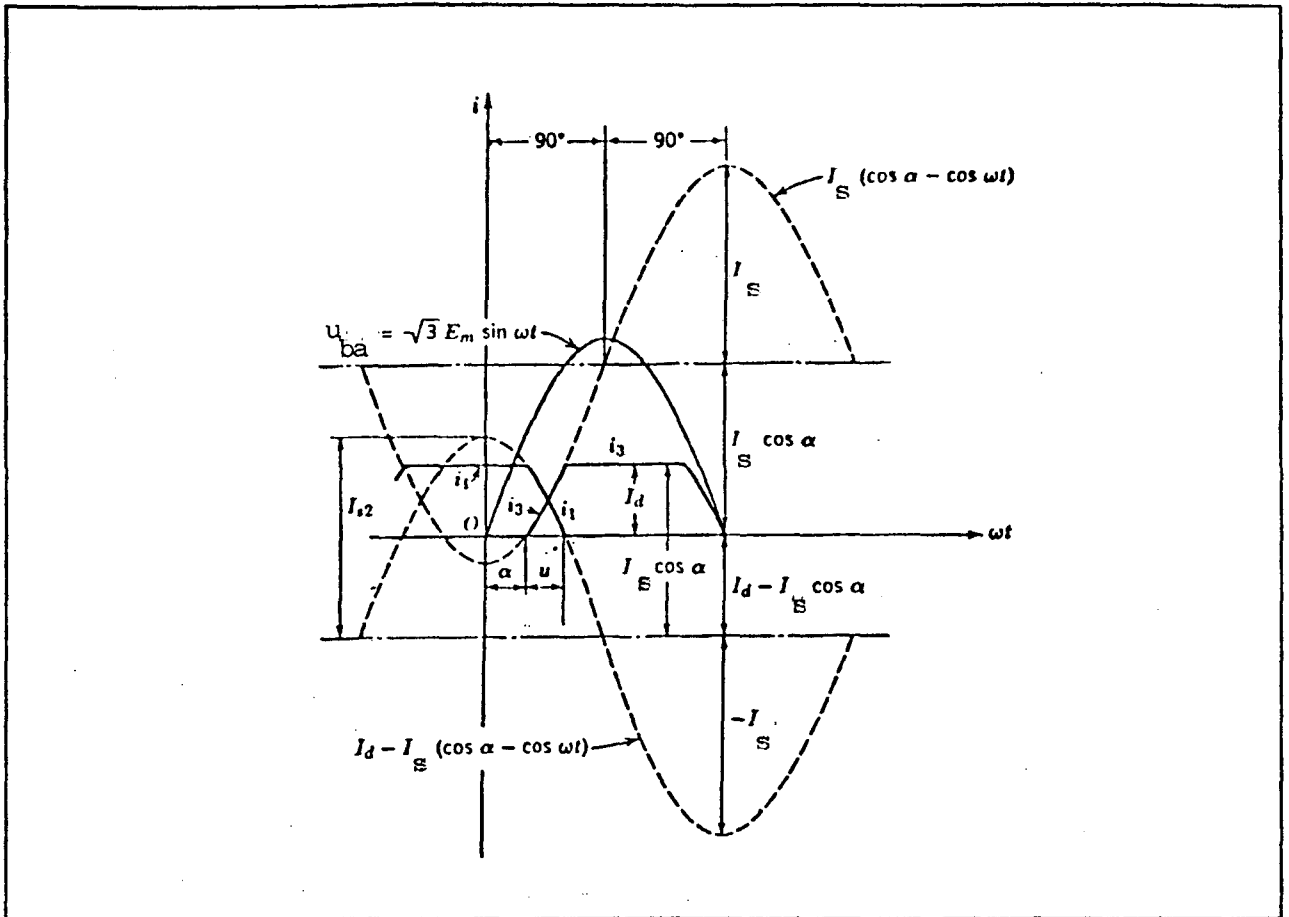


FIGURA 37 - Comutação da Corrente da Válvula 1 para a 3.

$$u_p = \frac{e_a + e_b}{2} \quad (d.18)$$

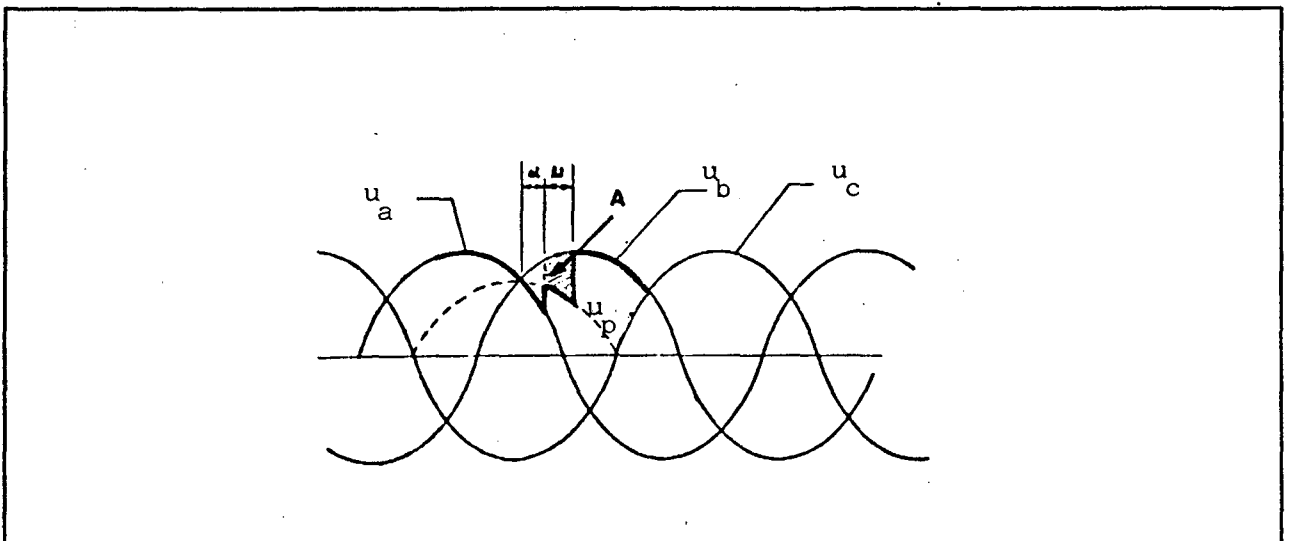


FIGURA 38 - Efeito da Comutação na Forma da Tensão.

A figura 38 mostra as fems que produzem a tensão CC. A área "A" indicada é responsável por um decréscimo no valor médio de U_d , devido à presença de indutâncias no circuito de comutação. O referido decréscimo, denotado por $\diamond U_d$, é calculado como se segue.

$$\begin{aligned} \diamond U_d &= \frac{3}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\mu} \left(u_b - \frac{u_a + u_b}{2} \right) dwt = \\ &= \frac{U_{d10}}{2} (\cos \alpha - \cos (\alpha + \mu)) = \frac{U_{d10} I_d}{2 I_s} \quad (d.19) \end{aligned}$$

A expressão da tensão CC, considerando agora o efeito da comutação, passa a ser:

$$\begin{aligned} U_d &= U_{d10} \cos \alpha - \diamond U_d = \\ &= \frac{U_{d10}}{2} (\cos \alpha + \cos (\alpha + \mu)) = \\ &= U_{d10} \cos \alpha - \frac{U_{d10}}{2 I_s} I_d = \\ &= U_{d10} \cos \alpha - \frac{3 w L_x}{\pi} I_d \quad (d.20) \end{aligned}$$

O fator que multiplica o termo I_d , na equação anterior, é conhecido como reatância de comutação, definida por:

$$X_c = \frac{3 w L_x}{\pi} \quad (d.21)$$

A equação (d.20) toma então a conhecida forma:

$$U_d = U_{dio} \cos \alpha - X_c I_d \quad (d.22)$$

Define-se por queda de tensão indutiva relativa (d_x), a reatância de comutação expressa em p.u., tendo como valores base U_{dion} e I_{dn} . Estes últimos são os valores nominais da tensão CC em vazio e da corrente CC. Desta forma tem-se:

$$d_x = X_c \frac{I_{dn}}{U_{dion}} \quad (d.23)$$

A equação (d.22), escrita em função de d_x , assume a forma abaixo:

$$U_d = U_{dio} \cos \alpha - d_x \frac{U_{dion}}{I_{dn}} I_d \quad (d.22)$$

Foi visto, no item anterior, que o ângulo do fator de potência (ϕ), que indica a defasagem angular entre a tensão CA e a componente fundamental da corrente CA era idêntico ao ângulo de disparo α . Esta conclusão só é válida se for desprezado o ângulo de comutação μ . O cálculo preciso de ϕ requer a decomposição em série de Fourier da onda de corrente, considerando agora o ângulo de comutação. Este processo é bastante trabalhoso e tem como resultado:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{2\mu + \operatorname{sen} 2\alpha - \operatorname{sen} 2(\alpha + \mu)}{\cos 2\alpha - \cos 2(\alpha + \mu)} \quad (d.23)$$

A componente ativa rms da corrente CA (I_p), ou seja, em fase com a tensão CA, e a componente reativa rms (I_q), absorvida pela conversora são dadas por:

$$I_p = \frac{\sqrt{6} I_d}{\pi} \cos \phi \quad (d.24)$$

$$I_q = \frac{\sqrt{6} I_d}{\pi} \sin \phi \quad (d.25)$$

A figura 39, retirada da referência [2], fornece as diversas formas de onda de tensão, para um conversor retificador operando com $\alpha=15^\circ$ e $\mu=15^\circ$.

D.3.- Operação como Inversor.

Uma vez que as válvulas conduzem em apenas uma direção, a corrente em um conversor não pode ser invertida e a inversão de potência só pode ser conseguida através de alteração da tensão CC terminal U_d .

As análises anteriores mostraram que sem considerar o efeito da comutação, a conversora opera como retificador se $0^\circ < \alpha < 90^\circ$, e como inversor se $90^\circ < \alpha < 180^\circ$. Contudo, para μ diferente de zero, o valor de α ao qual se inicia a inversão deve satisfazer a condição imposta pela equação (d.20), ou seja, o instante em que U_d muda de sinal. Portanto:

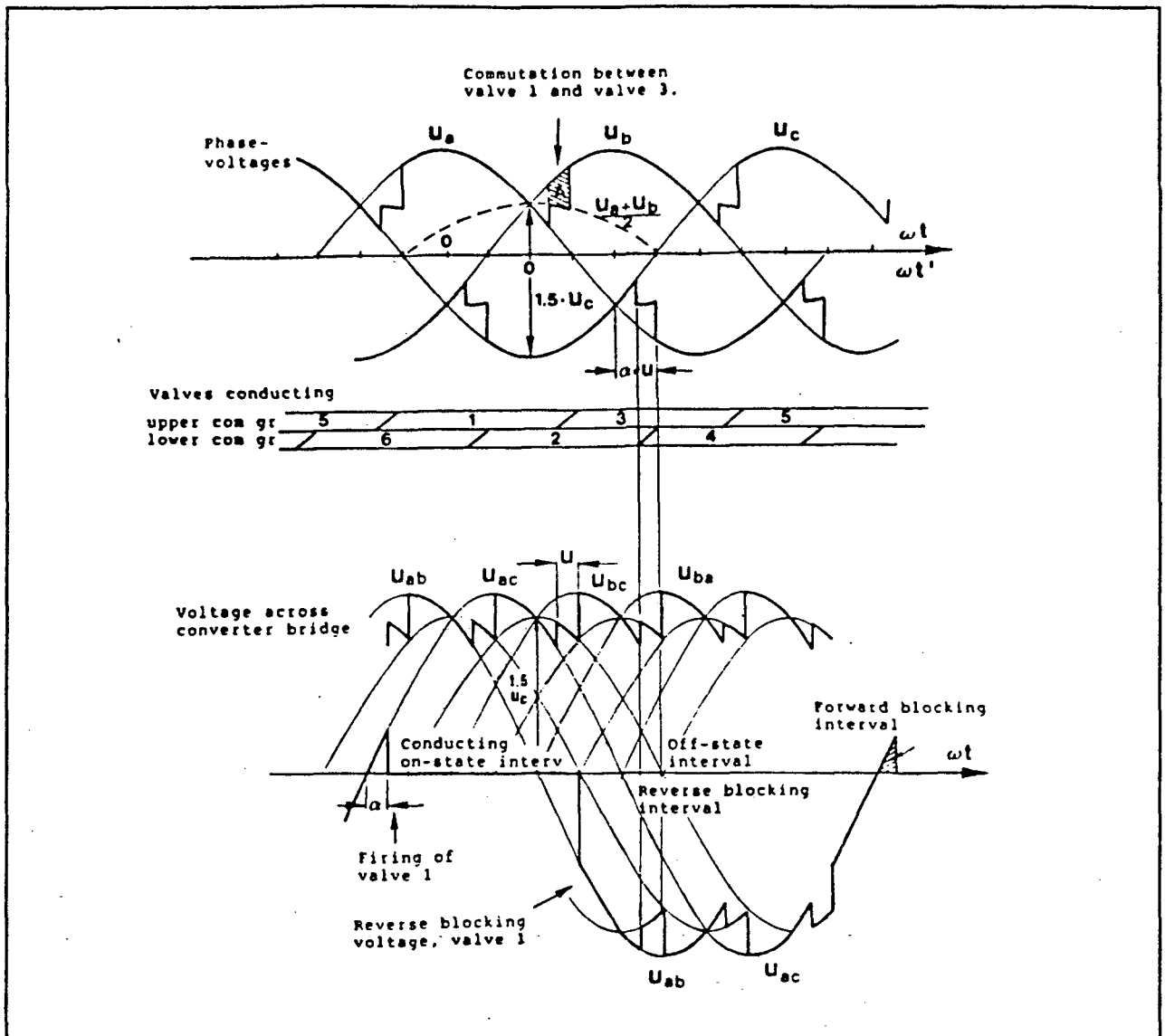


FIGURA 39 - Operação em Modo Retificador: $\alpha = 15^\circ$
 $\mu = 15^\circ$

$$\cos \alpha + \cos (\alpha + \mu) = 0 \quad \text{ou,}$$

$$\alpha = \frac{\pi - \mu}{2} \quad (\text{d.26})$$

A tensão u_{ab} envolvida na comutação da válvula 1 para a válvula 3 é mostrada na figura 40. Teoricamente, para que a comutação se processe, os ângulos α e μ podem somar até 180° . Entretanto, o sucesso da comutação da corrente entre estas válvulas exige uma margem de comutação τ , para que as barreiras de potencial dos

tiristores da válvula 1 possam ser refeitas e esta tenha condição de bloquear a corrente, quando a tensão u_{ab} tornar-se negativa.

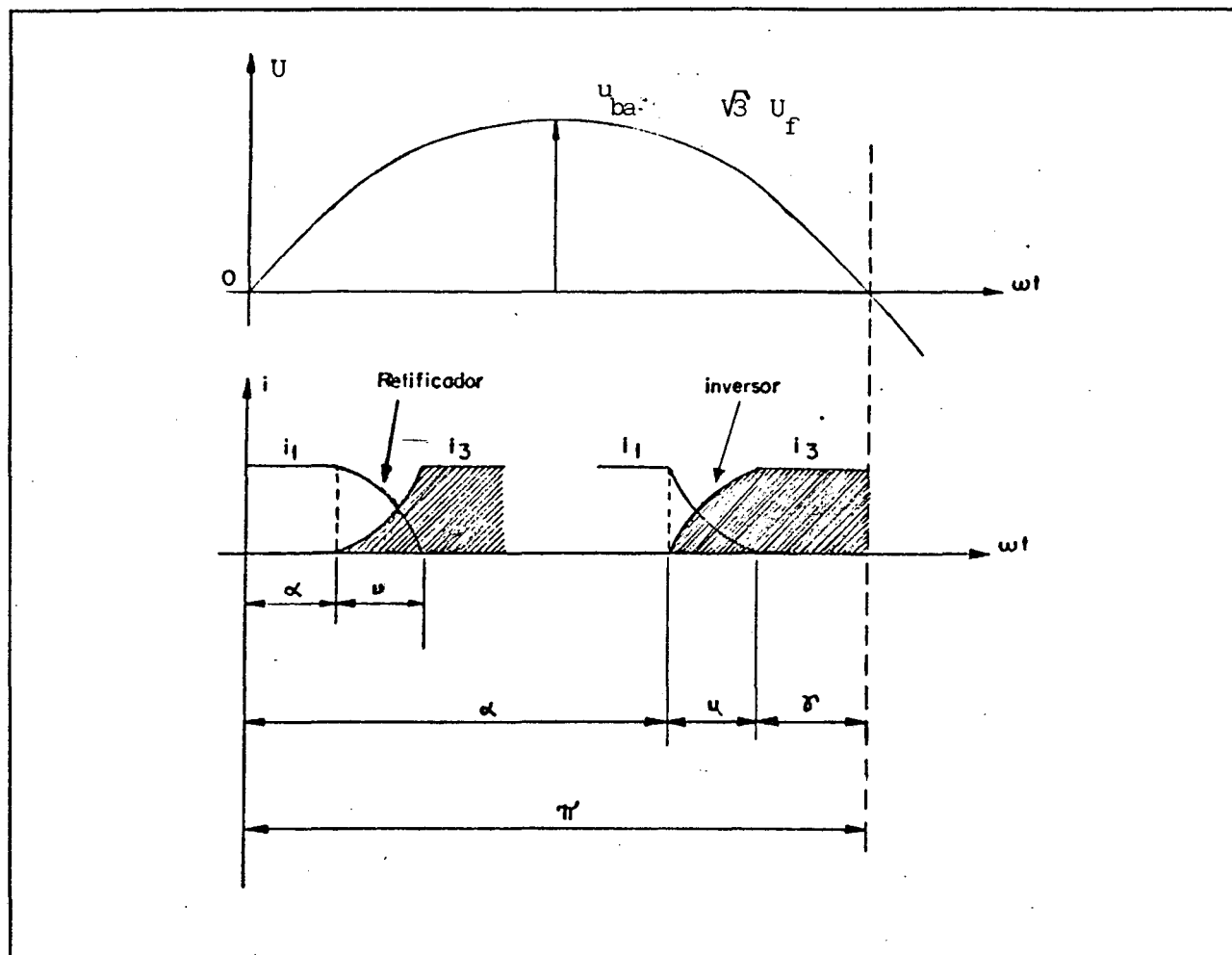


FIGURA 40 - Tensão Envolvida na Comutação da Válvula 1 para a 3.

Se esta margem não for respeitada, a comutação não se processa e a corrente continua a fluir através da válvula 1, o que é conhecido como falha de comutação. Nas instalações CCAT existentes, γ , comumente chamado de ângulo de extinção, é mantido acima de 12° .

Observando-se a figura 40 é possível concluir que a relação entre os ângulos de extinção, comutação e disparo é a seguinte:

$$\alpha + \mu + \tau = 180^\circ \quad (d.27)$$

A inserção da equação (d.27) na equação (d.20) permite a expressão da tensão U_d em função do ângulo de extinção τ , conforme se segue.

$$\begin{aligned} U_d &= - \frac{U_{d10}}{2} (\cos \tau + \cos (\tau + \mu)) = \\ &= - (U_{d10} \cos \tau - \frac{3 w L_k}{\pi} I_d) \end{aligned} \quad (d.28)$$

A referência de tensão, para a operação da conversora no modo inversor, é normalmente escolhida na direção oposta à adota para o modo retificador. Como resultado, o sinal negativo à frente das equações anteriores deve ser desconsiderado, e estas equações assumem então a mesma forma das equações (d.20), sendo α , no caso do inversor, substituído por τ . Esta mesma afirmativa é válida também para a equação (d.23), que fornece o ângulo de fator de potência ϕ .

Em termos de d_x , a equação da conversora em modo inversor pode ser escrita na forma abaixo:

$$U_d = U_{d10} \cos \tau - d_x \frac{U_{d10n}}{I_{dn}} I_d \quad (d.29)$$

A figura 41, publicada na referência [2], apresenta as formas de onda de tensão, para um inversor com $\tau = 15^\circ$ e $\mu = 15^\circ$.

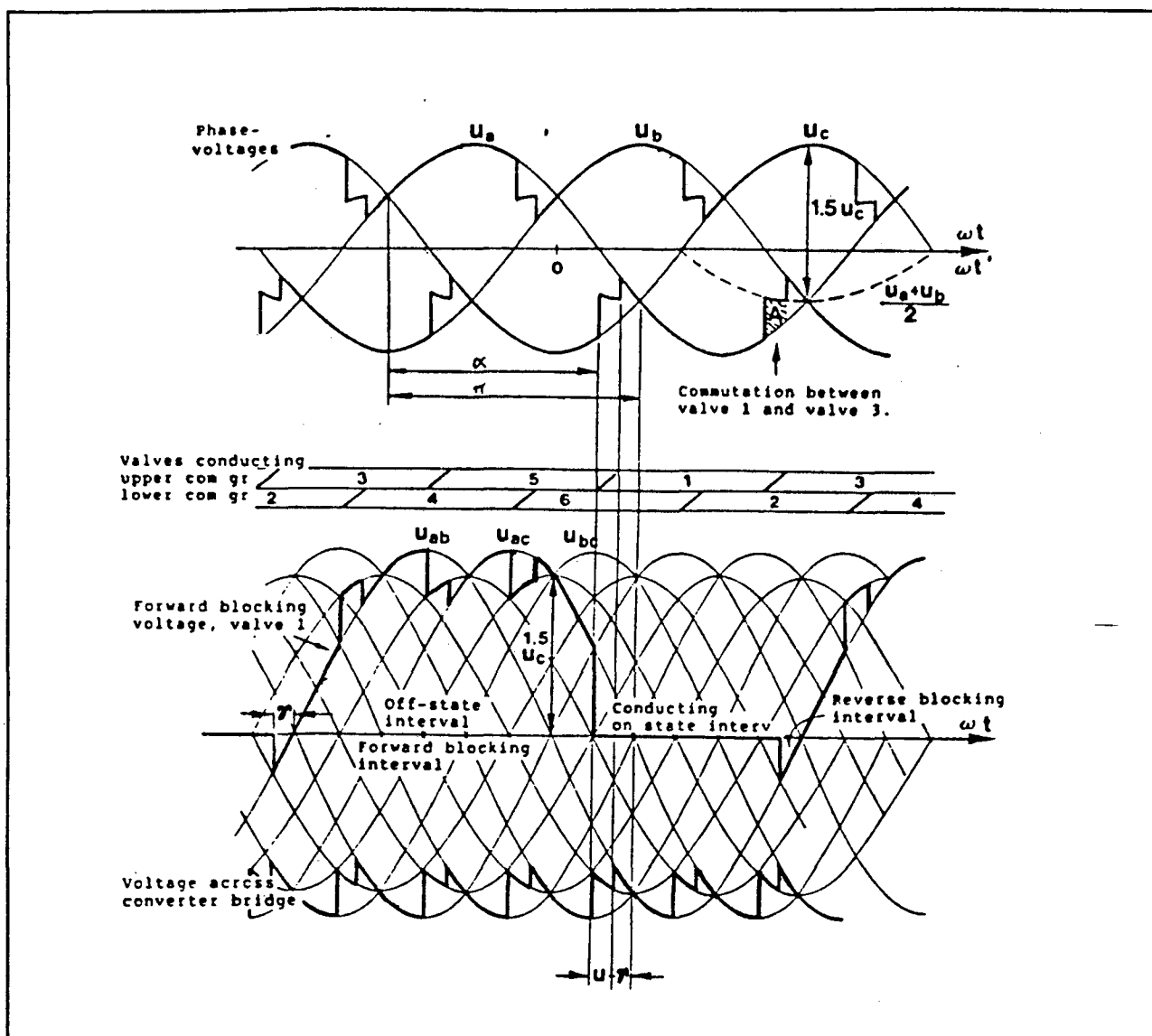


FIGURA 41 - Operação em Modo Inversor: $\tau = 15^\circ$
 $\mu = 15^\circ$